

企画セッション

「河川堤防研究で抜け落ちていること」

～今，水工学では堤防に関して何がどこまで分かって来て，
地盤工学と何を一緒に進める必要があるのか～

中央大学研究開発機構
福岡捷二

1・まえがき

近年の豪雨外力の増大は、整備途上段階にある我が国の河川の安全性にとって深刻な問題をもたらしている。河道断面形が完成形となっていない、断面形不足は計画流量以下の洪水であってもHWLを超える水位となって流れる場合が容易に起こり得る。

これまでのような、HWLまでの水位を対象とした河川管理施設の計画・設計では、それ以上の水位の洪水流に対しては、損壊、破壊の危険性が高く、長期有洪水を含めた新しい視点での堤防、河道の計画・設計技術の検討が必要である。

本文では、特に、**上述の観点から河川堤防研究で抜け落ちている主要な技術課題を示し、地盤工学と水工学が一緒になって時代の要請に応える堤防工学技術の確立に向けての河川堤防研究について論じる。**

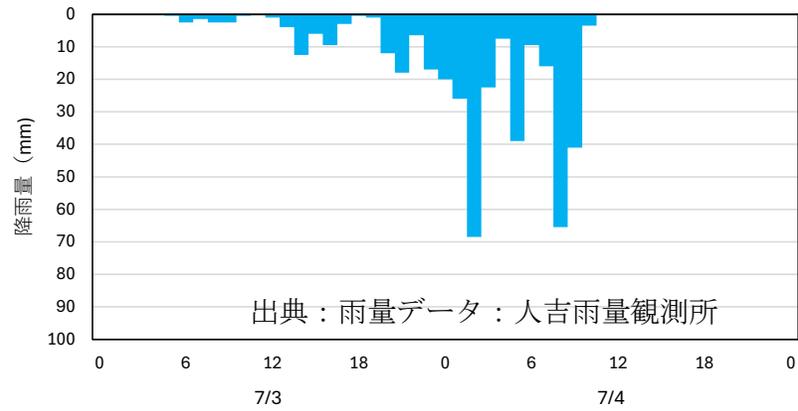
1. 我が国の河道は完成河道には程遠い整備途上段階にあることから、計画流量はもとより計画流量以下の洪水であっても、計画高水位（HWL）を超えて流れる超過洪水が河道で容易に発生する。
 - ・堤防と河道は大きな流量の洪水流を一体的に安全に流下させる役割を有しているが、流量が増大すると、洪水流の水位と流速が増大し、破壊力の高いエネルギーフラックスを持って河道を流れる。この大きな洪水エネルギーは、河道において、激しい河床や河岸の洗掘や堆積と言った土砂移動をもたらし、時空間的に変化する三次元エネルギー分布の激しい流れ場を発生する。このような洪水流に対する堤防と河道の安全性は、河道の土砂の移動と河床の構造を正しく捉えた洪水流の三次元的なエネルギー分布から明らかになり、これより堤防と河道の一体設計法が確立されることになる¹⁾。

2. 近年の激しい雨の降り方に対する堤防と河道の一体設計

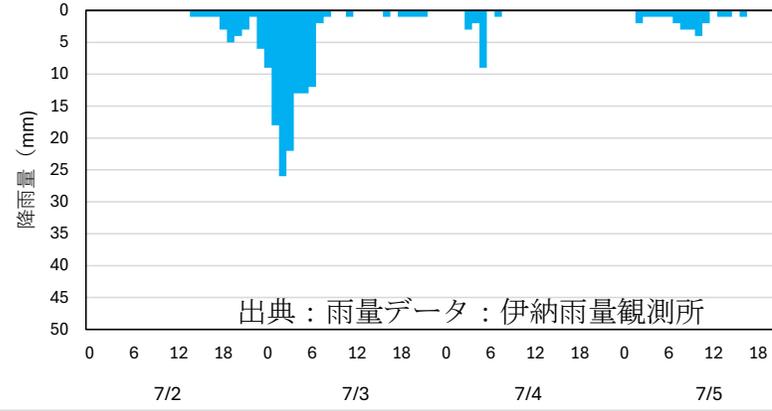
気候変動と関連し、豪雨の頻度、強度、継続時間等、雨の降り方が大きく変化し、治水施設の計画、設計に雨の影響を適切に反映する必要性が生じて来た。すなわち、河川流域において発生する豪雨が、2山、3山のピークを持つようになり、それに伴って2山、3山の長い時間続く洪水が起こるようになってきた(2020年7月の球磨川(3山)、2020年7月の筑後川(3山)、2018年7月の小田川(2山)、2018年7月の千歳川(3山)、2011年7月五十嵐川(2山))。長時間における豪雨に起因する破堤の代表は、昭和51年9月長良川で4山のピークを持つ連続豪雨が発生し、4波目の降雨ピーク直後に破堤した長良川堤防である²⁾。

従来は1山ピークの洪水流に対して、堤防や河道の設計が行われてきたが、豪雨の長期化や、2山、3山の洪水発生は、**堤防の浸透破壊危険性を高め、越流破壊を含め洗掘破壊危険性も高くなってきている。**

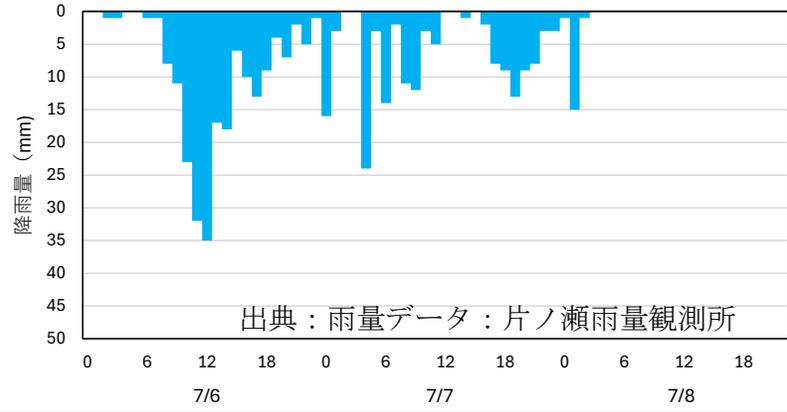
球磨川令和2年7月豪雨



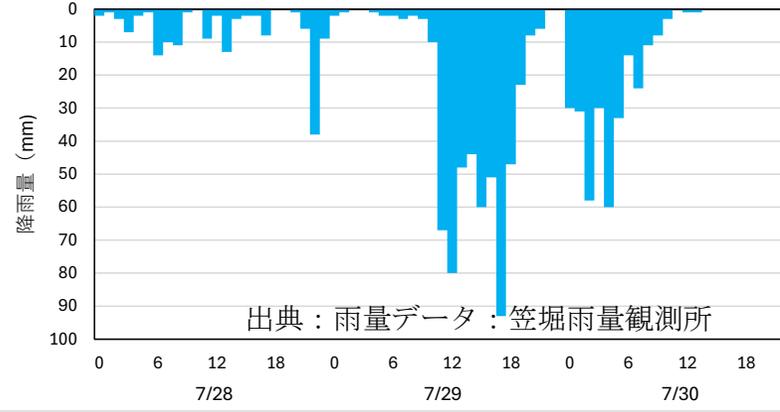
石狩川平成30年豪雨



筑後川令和2年7月豪雨



五十嵐川平成23年豪雨



小田川平成30年西日本豪雨

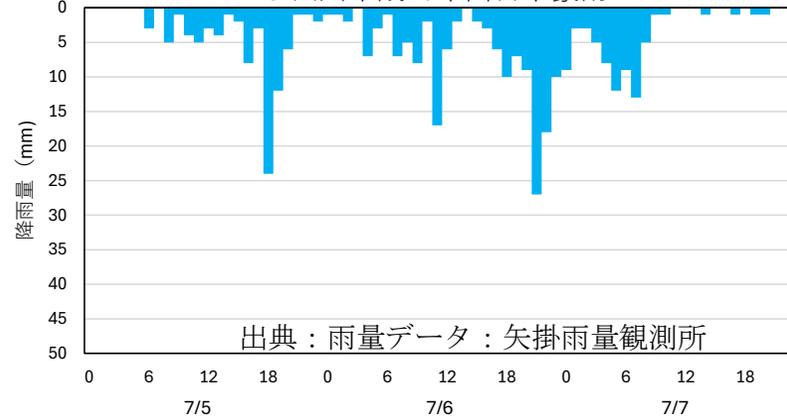
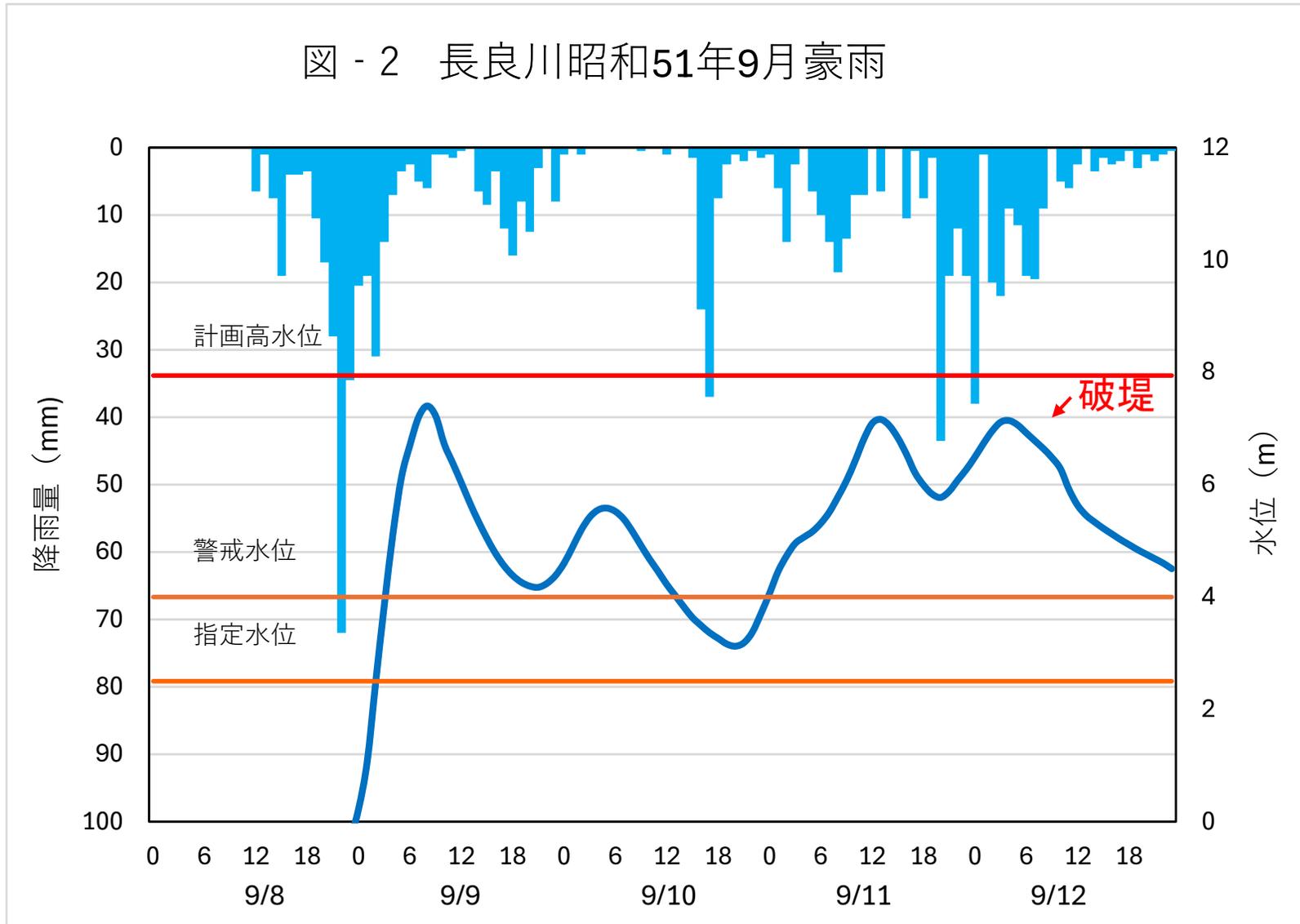


図 - 1 近年の二山，三山豪雨の事例

図 - 2 長良川昭和51年9月豪雨



出典：雨量データ：忠節雨量観測所，水位データ：墨俣水位観測所

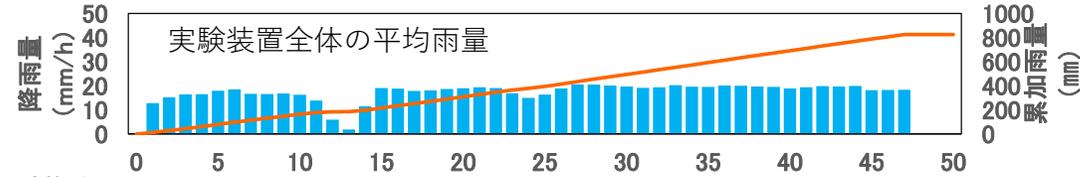
3. 豪雨時の堤体内における降雨貯留量分布と堤体の安全性の検討

雨の頻度，強度，継続時間の増大に対して，雨の浸透が堤防の安定性に及ぼす影響の評価は十分でない．豪雨時の堤体への水の侵入，貯留，流出過程は，山地における降雨の地中での貯留，川への流出過程と同様な機構と考えられ，ここで行われている水収支の考え方³⁾に基づく研究は堤防における降雨の移動機構の検討に役立つ．

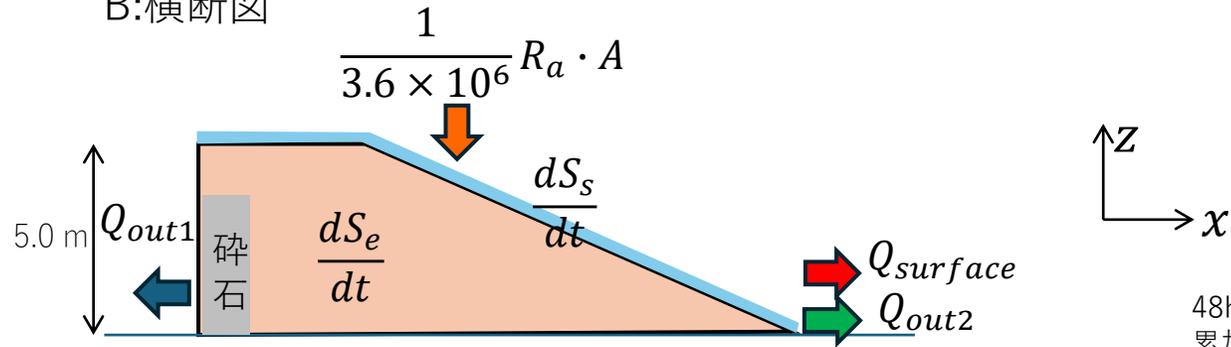
堤体内で降雨がどのような挙動をとるかは，降雨の強さ，継続時間，堤体の土質，飽和，不飽和浸透層の状況，排水の状況等の種々の影響を受け，複雑な挙動をすることが知られている．河川堤防においては，この後河川水位が上昇し河川水の侵入も起こることから，堤防の安定性に対する降雨の重要性は高い．豪雨による堤体への降雨浸透は今後一層重要な課題になると考えられるが，**地盤工学，水工学分野のそれぞれの特色を生かした研究，共働が急がれる**．降雨浸透に関する大掛かりな研究として，1982年建設省土木研究所（当時）の土質研究室久楽室長，丹羽主任研究員らが行った図-2に示す大型盛り土での降雨浸透実験がある⁴⁾．

図-3
久楽らによる大型
模型堤防における
降雨浸透実験

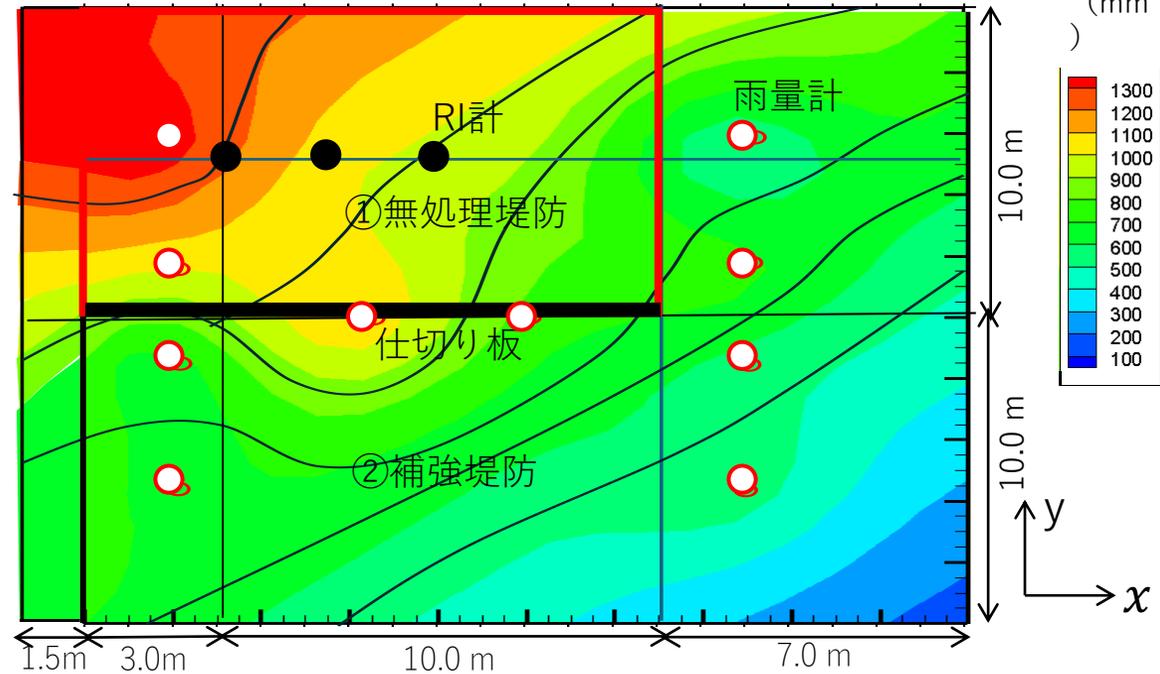
A:降雨ハイト図



B:横断面図



C:平面図



この実験は、補強堤防の研究が主要な目的であったが、同時に無処理堤防における降雨浸透についても詳細な調査がされている。白石ら⁵⁾は、この無処理堤防の実測観測結果を用いて、式(1)より水収支図を作成し水の挙動を逆推定し用とするものである。複雑な土質構造の堤体におけると水の貯留と移動機構を見える化するものであり、現行の飽和、不飽和土に対する堤防の安定性解析に対し、新しい視点での考え方の提示である²⁾。

$$\frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_s}{dt} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} R_a \cdot A - Q_{out1} - Q_{out2} - Q_{surface} \quad (1)$$

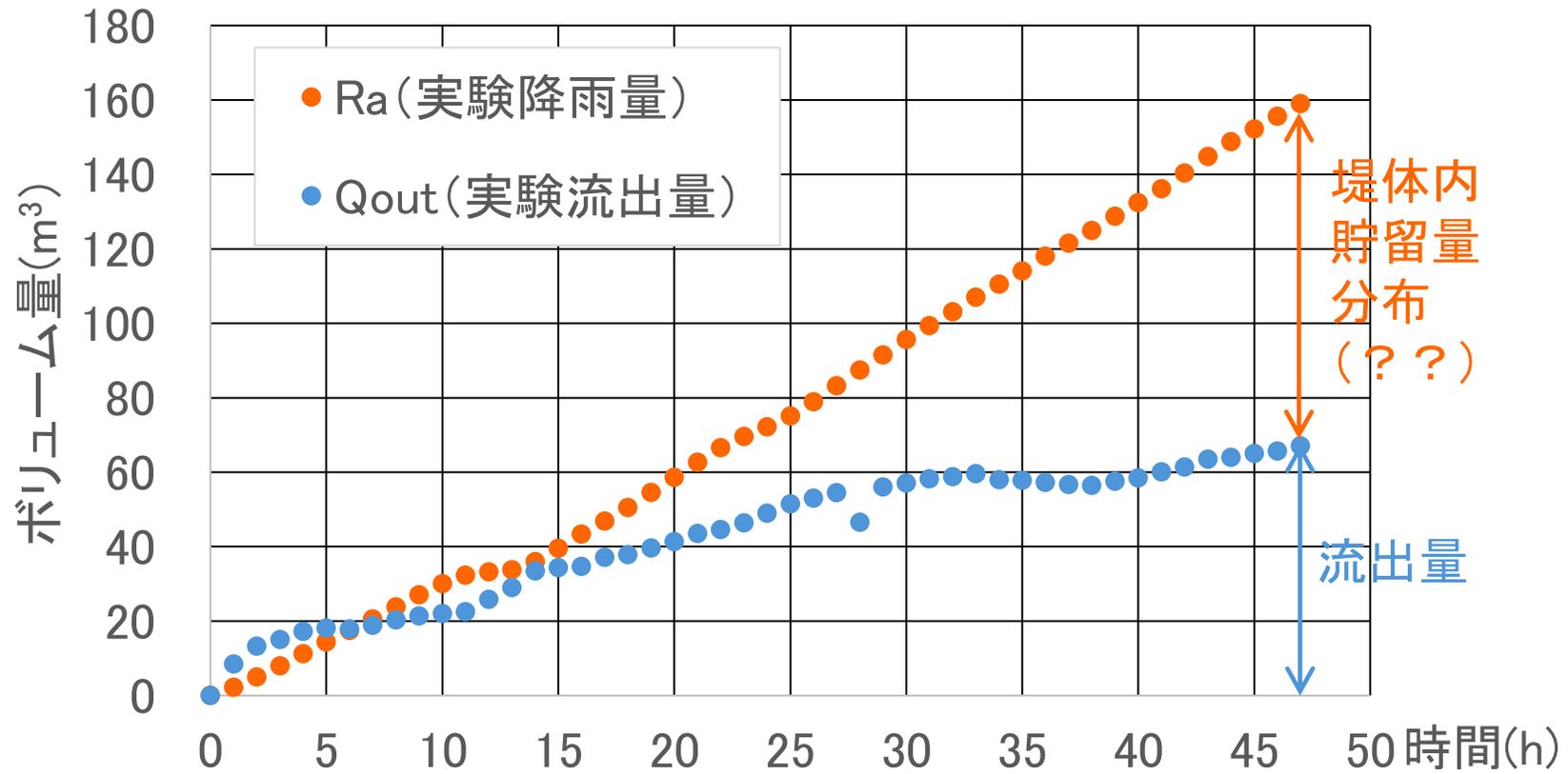
S_e : 堤体内の水の貯留量(m³) , S_s : 堤体表面の水の貯留量(m³)

R_a : 堤体への降雨量(mm/h)

A : 堤体表面の投影面積(m²) , Q_{out1} : 砕石側からの流出量(m³/s)

Q_{out2} : 堤体法尻からの流出量(m³/s) , $Q_{surface}$: 堤体表面からの流出量(m³/s)

図-4は、堤体盛土に対する降雨量分布、堤体からの流出量分布を知って堤体内の時間的な貯留量変化、堤体内水収支分布を示す。赤丸、青丸は、それぞれ、降雨量、流出量の累積分布を示し、その差が堤体内貯留量分布であり、ゴールは、堤体内水量の貯留量分布の中身を知ることにある。



$$\frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_s}{dt} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} R_a \cdot A - Q_{out1} - Q_{out2} - Q_{surface}$$

図-4 堤体内の貯留量分布図

4. 洪水流の三次元エネルギー分布に基づく河道と堤防の一体設計

4.1 洪水流の三次元エネルギー分布の評価法

- 近年，洪水時の水位が堤防天端高さに匹敵する大規模洪水が起こっており，河道と堤防の一体設計の重要性が高まっている．これには洪水時の水位・河床高に速度水頭と圧力の非静水圧水頭を加えた洪水の全エネルギー水頭分布の時空間変化を求めることが必要になる（福岡2023¹⁾，2024⁶⁾）。
- 洪水の全エネルギー水頭 $H_{all}(x, y, t)$ は，洪水の三次元エネルギー水頭 $H(x, y, z, t)$ が式(2)で定義されることから，その地点の三次元エネルギー水頭 $H(x, y, z, t)$ を底面から水面まで積分することにより準三次元洪水流解析(Q3D-FEBS)から計算された局所的な流速・圧力・河床高を用いて洪水の局所三次元エネルギー水頭 $H(x, y, z, t)$ を求め，これを底面から水面まで積分することにより式(3)で評価される。

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

$$H_{all}(x, y, t) = \frac{1}{h(x, y, t)} \int_{z_b}^{z_s} H(x, y, z, t) dz \quad (3)$$

ここで， u, v, w は三次元空間における x, y, z 成分の流速， p は圧力， ρ は水の密度， g は重力加速度， h は水深， δp は圧力の非静水圧成分， z_b は河床高， \hat{z} は河床高 z_b を基準とした高さである。

従って、式(3)より洪水流の全エネルギー水頭の時空間分布を評価するためには、位置エネルギーである河床高 $z_b(x, y, t)$ の時空間分布の変化、特に砂州の移動による河床高の上昇による地形変化による位置エネルギーの増加量の把握が極めて重要である⁷⁾。図-5は、令和元年多摩川における計画規模を超える大洪水による、低水路の砂州の移動と堤防際の高水敷の洗掘箇所を示す。図-6(a)(b)は、洪水中の地形の変化と全エネルギー水頭の三次元分布を示す。流量の増大とともに砂州成長し堤防に接近し、その時洪水エネルギーの流れも堤防に向かって収束している。その結果、堤防際の高水敷上に洗掘が起こったことが分かる。同様にこの洪水期間中に、多摩川の各所で、高い全エネルギーの集中によって、高水敷の洗掘や構造物の被災が生じており、これはいずれ砂州の大掛かりな移動によって引き起こされていることが明らかになった。

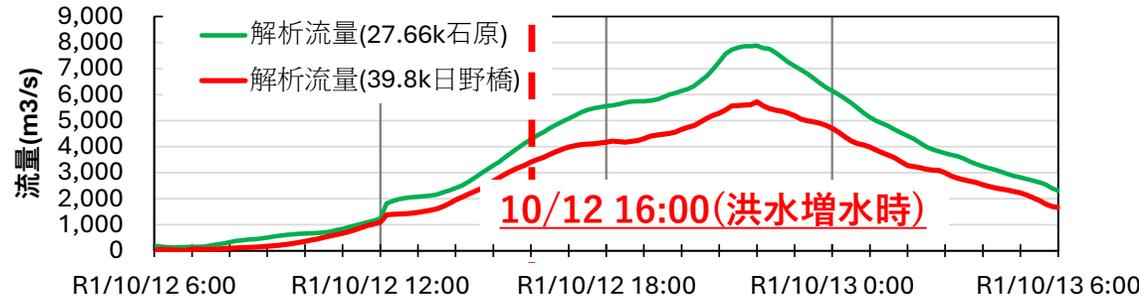
図-5 令和元年東日本台風における京王線多摩川橋梁の被災状況

洪水後(R1.11)

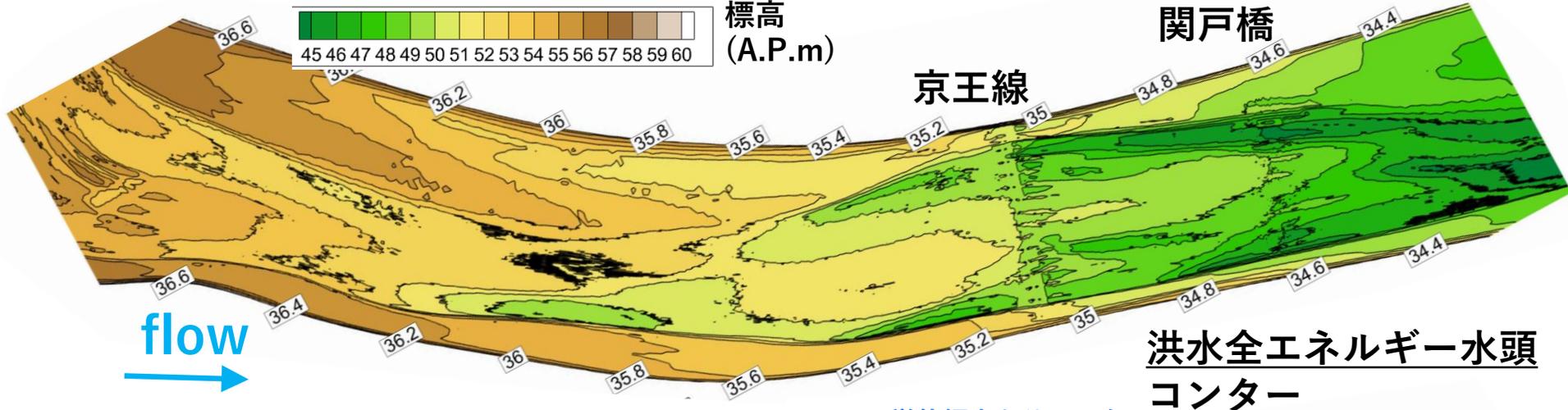


洪水中の砂州の動き $z_b(x, y, t)$ を精緻に追うことにより流れの三次元エネルギー分布の変化を知り、堤防際の高水敷の大規模な洗掘箇所の予測が可能となる。

図-6(a) 京王線周辺における洪水全エネルギー水頭とその輸送フラックス(増水期)



河床高コンター



洪水全エネルギー水頭
コンター

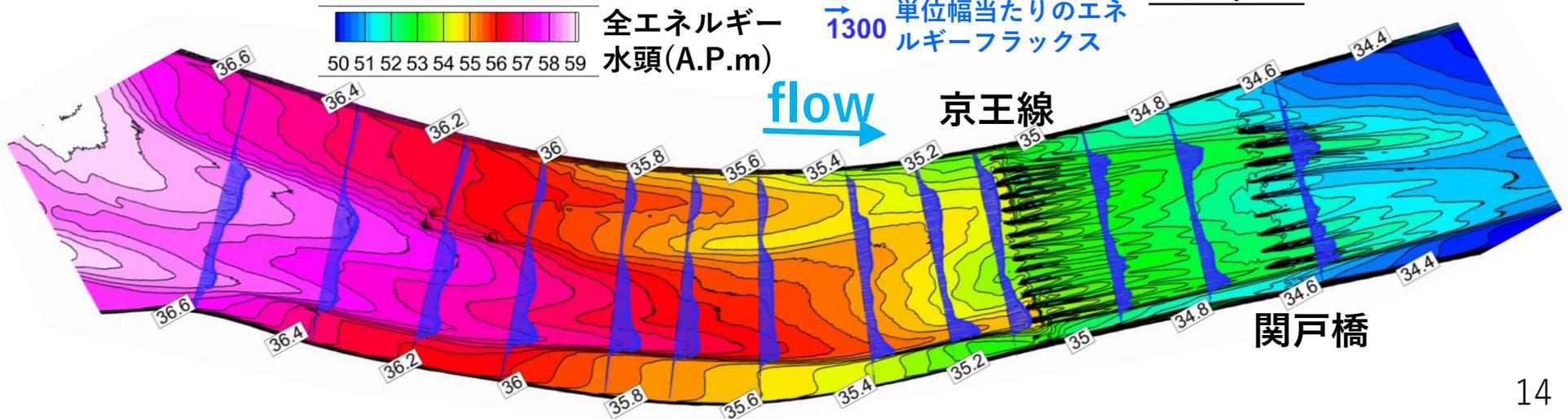
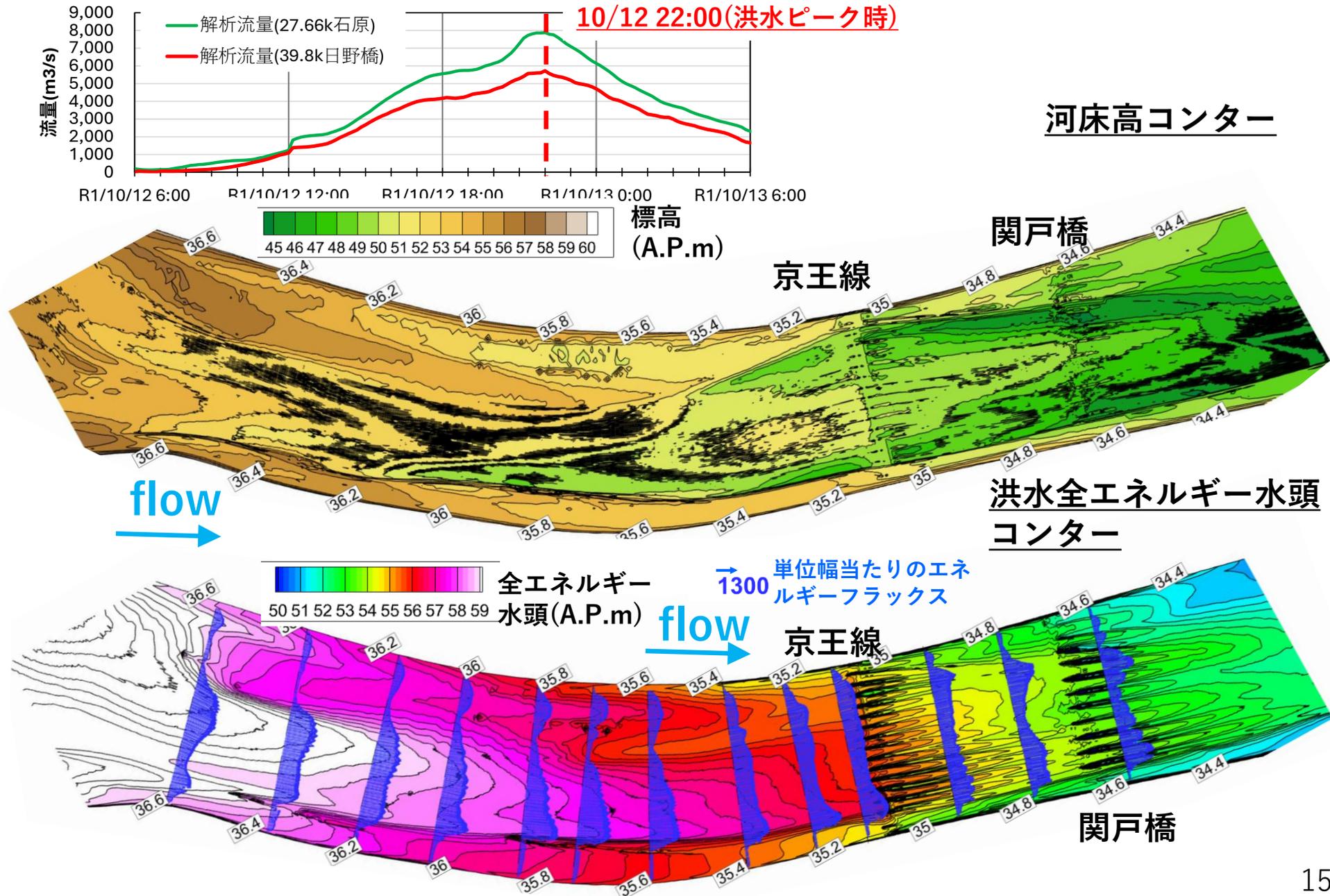


図-6(b) 京王線周辺における洪水全エネルギー水頭とその輸送フラックス(ピーク時)



4.2. 洪水時のエネルギー水頭高が堤防天端高さを超えているときの高水敷及び堤体表のり面の被災長

超過洪水が発生すると、堤防の余裕高部を（HWLを越えて）流れたり、水衝部に著しい水流の集中を起こしたり、堤防天端上を越流したりし、流水の通常的作用とは著しく異なる流れが発生する。また河川横断構造物による抵抗のために構造物直上流で水位が上昇する等周辺流れが大きく影響を受け河床の状況が大規模に変化し災害につながることを4.1で示した。このような事象に対応するため粘り強い堤防等が検討され始めていることを考えると、**河道のどこが破壊危険性の高い危険個所になるか、どのような破壊の形態をとるか等をできるだけ高い精度で推定出来なければならない。**

図-7 aは、信濃川支川五十嵐川における平成23年洪水時の高水敷及び堤防表のり面の洗掘、図-7 bは、令和元年多摩川洪水における日野橋の沈下災害を示す。これらはいずれも、河道内を高いエネルギー水頭を持って洪水が流れたことによる典型的な災害事例である⁸⁾。

図一7 高いエネルギー水頭時の河川施設の被災事例



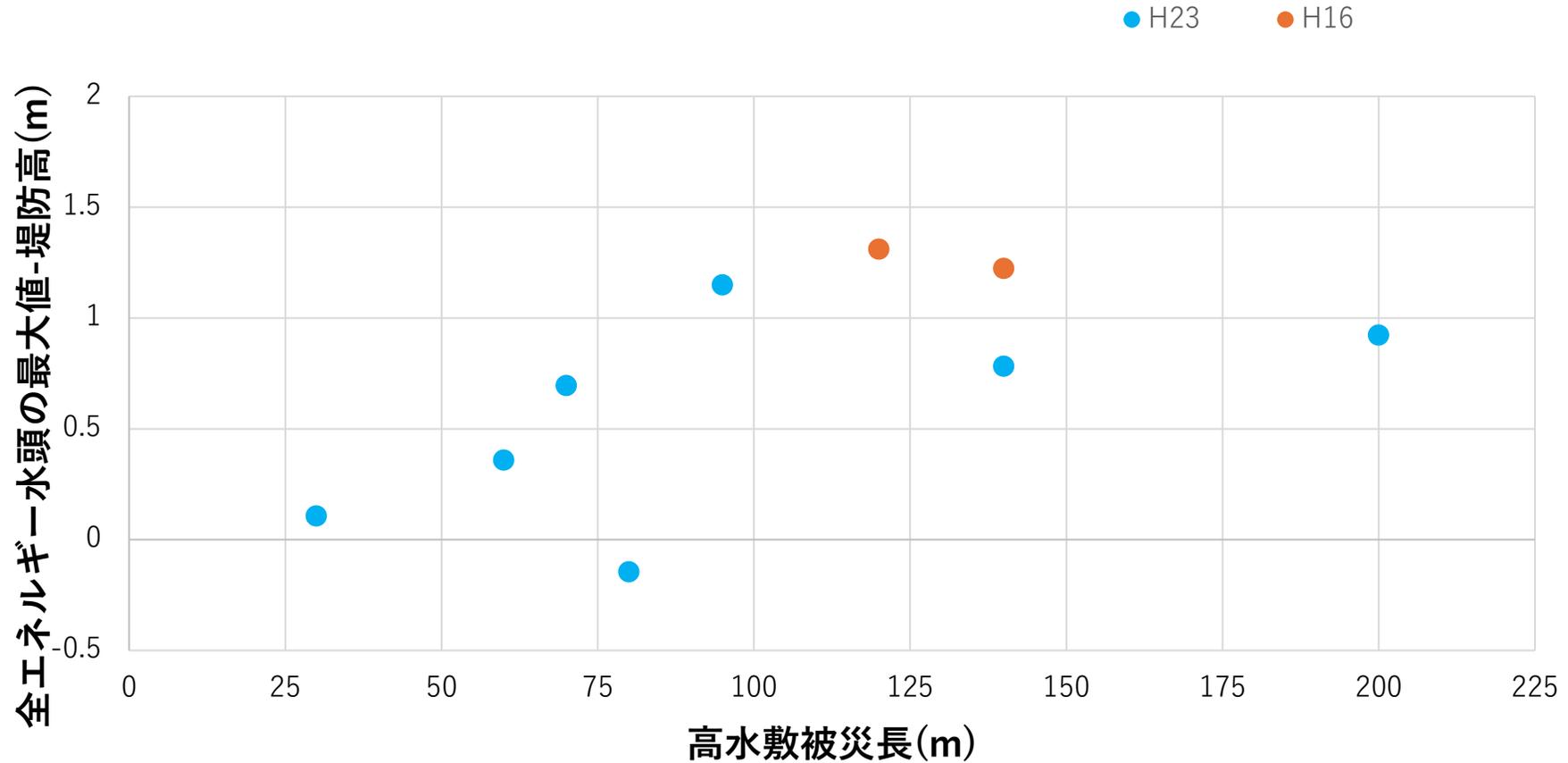
図-7a 五十嵐川における高水敷、堤防表のり面の被災比例



(c) 日野橋橋脚の被災状況

図-7b 多摩川日野橋のP5橋脚の局所洗掘による沈下

図－8 五十嵐川洪水流の全エネルギー水頭が堤防高を超える時の
高水敷洗掘被災長

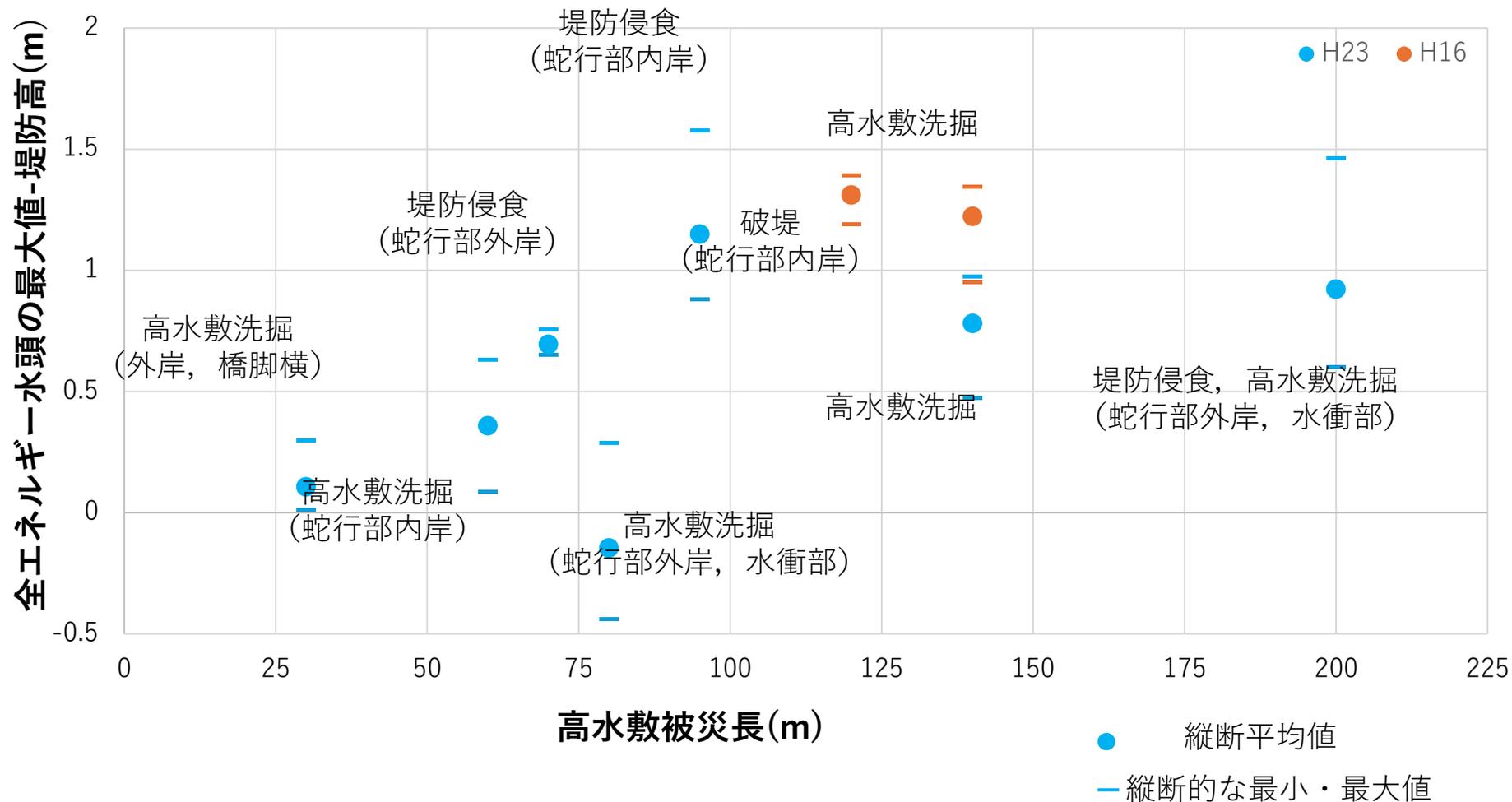


縦軸：横断面内での全エネルギー水頭の最大値－堤防高
横軸：縦断的な被災長さ

図-8は、五十嵐川の平成16年と23年洪水時における（エネルギー水頭高一堤防天端高）に対する（高水敷の洗掘被災延長）の関係を示している。一般に、堤防の天端高さは、河道のHWLの上に計画流量との関係で一定の大きさの余裕高を与え決められている。従って図8の縦軸の値である全エネルギーと堤防天端高さとの差が大きいということは、洪水流の持つエネルギーが十分に高いことを示しており、それ原因となって、高水敷の被災延長が大きくなったと考えてよい。

まずは高水敷河床の侵食が比較的広い範囲で起こっている場所が堤防侵食・破堤の危険性の高い箇所であり、それらの洗掘原因が何によるものかを明確にする。図-9は、縦断洗掘距離の広い区間の全エネルギーを区間ごとに解析し、これを狭い区間に分けて全エネルギーを調べ、それらの最大、平均、最小値をプロットしている。低水路の線形や、高水敷幅、全川幅、構造物の有無等によって、全エネルギー水頭の値は異なっている。このような検討をいろいろな河川で行うことによって、洪水流の全エネルギー水頭に対する堤防天端の高さの差から堤防の危険箇所、その耐力等が分かることになる。

図一 9 被災長と全エネルギー水頭の堤防高からの高さの関係(H16,23)



5. あとがき

エネルギー水頭の三次元分布の推算から、堤防等の破壊の可能性の高い箇所が推定できることを示した。今回は、実際に洗掘が大規模に起こった場所を指標に、三次元全エネルギー解析法の考え方の堤防の破壊に関係づけることの妥当性を示した。しかし、逆に、同じ条件でも洗掘や破壊が起こらなかった場所は、堤防の耐力が違うために生じたのか等、地盤工学面、構造解析から評価が出来るようになることが、堤防破壊の合理的な設計へと繋がっていくものと期待される。近年の水理解析技術の進展は著しいものがあり、地盤の特性解析技術と併せて堤防と河道の安全設計に有効になる日が近いことを期待している。

引用文献

- 1) 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，pp.209-214，2023.
- 2) 国土交通省木曾川上流河川事務所HP：昭和51年9月12日一長良川安八町の破堤概要一.
- 3) 石井優太郎，吉村俊彦，福岡捷二：石狩川下流域における支川群の洪水流出特性と本川洪水への影響，河川技術論文集，第28巻，pp.121-126，2022.6.
- 4) 久楽勝行，丹羽薫，斉藤義章，石塚廣史：堤防補強に関する大型模型実験(1)，土木研究所資料，第1772号，1982.
- 5) 白石芳樹，竹村吉晴，後藤岳久，福岡捷二：模型大型堤防における降雨時の水収支解析に基づく堤体内の水の貯留および流出過程の検討，第12回河川堤防技術シンポジウム，pp.5-8，2025年1月28日.
- 6) 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B河道計画・設計法，第30巻，pp.411-416，2024.
- 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，pp.33-36，2025年1月28日.
- 8) 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洪水流による堤防・河道被害：第12回河川堤防技術シンポジウム，pp.29-32，2025年1月28日.