

2025年度河川技術シンポジウム
OS1 水災害多発時代の河川技術のあり方
土木学会講堂 令和7年6月19日

時代の要請に応える河川技術の これまでとこれから

中央大学研究開発機構
福岡捷二

講演内容

1. はじめに
2. 流域治水の加速化－流域水収支図によるマネジメント
3. 複断面蛇行河道における超過洪水時の流れの構造と河床砂州の変形
4. 洪水流のエネルギー分布の重要性とその評価法
5. 洪水流のエネルギー分布から見た令和元年多摩川大洪水による被災とその原因
6. 信濃川支川五十嵐川における超過洪水時の高水敷及び堤体表のり面の洗掘発生と堤防天端高さを超える全エネルギー水頭の関係
7. 河川管理施設構造令の見直しの必要性－人命を守る河川事業
8. 超過洪水流に対する堤防と河道の一体設計－堤防余裕高部分の強化とその活用
9. まとめ

1. はじめに

1.1 問題意識

気候変動，自然の外力の増大
自然，社会，経済の変化に対応する社会資本整備のあり方が問われている

河川流域及び河川に対する影響の大きさ
現在の河川改修の進め方，スピードでは社会の安全を守れない
超過洪水に対する対応，人の命を守る

流域治水への転換
河川流域，河川改修のあり方はどうあるべきか，
治水と環境
河川技術の変革の必要性，**法律，制度**の見直し

河川に係る技術者，研究者の意識改革

1.2 本講演の狙い

- (1) . 我が国で行われてきた河川改修や、河川技術の蓄積が川づくりにどのように活かされて来たかを知り、その上に立って、これからの水災害多発時代に対して、官・学・民の総力を挙げて社会の要請に応える河川の技術開発を進めていくこと、
- (2) . 流域治水への政策転換において、氾濫による浸水リスクを流域治水関係者と協働で低下させ、また、河川改修による河道の安全性の確保や治水と環境の調和の実現に向けて技術的な解決策を見出していくこと、
- (3) . そのために、本講演では次のことが議論される。

流域治水マネジメント技術として「**流域水収支**」の考え方を取り入れ、流域全体を見た治水、河川の治水と環境の調和をすすめること、また**超過洪水に対応する河川技術として、人の命を守る堤防と河道の一体設計の技術が必要**であること、

河川管理施設等構造令等制度の見直しについての議論、河川及び流域の土砂移動について十分な理解と**技術**が必要であり、これらを流域治水技術に活かすこと。

2. 流域治水の加速化—流域水収支図によるマネジメント

2.1 洪水流における河道貯留の重要性

河道における洪水流の流下機構は、その非定常性と河道断面の不規則性に起因する水の貯留と排出過程からなっており、**多点で観測された洪水流の水位縦断分布の時間変化は、洪水流の貯留、排出過程を見える化し、洪水流の高精度解析に重要な役割を果たしている。**

図-1及び図-2は、令和2年7月の球磨川豪雨時の渡～人吉地点の洪水流について、観測された水面形の時間変化に一致するように準三次元洪水流解析を行い、この解析結果と実際に起こった洪水氾濫流の時空間変化状況の比較結果を示す¹⁴⁾。両者は良く対応しており複雑な洪水水理現象をよく説明している。このように、洪水流の水面形の時間変化を与条件とした高精度な洪水流解析法は、洪水流の理解を大きく前進させ、その活用は、河道の設計、河川の管理技術の信頼性を著しく高めてきた^{11)~13)}。

最初に河道の水収支を考える。 任意地点 x での流量を $Q_{(x)}$ 、 Δx 下流側での流量を $Q_{(x+\Delta x)}$ とすると、解析区間内の河道貯留量 S_{river} が上下流の流量ハイドログラフから式 (1) で求まる。

$$\frac{dS_{river}}{dt} = Q_{(x)} - Q_{(x+\Delta x)} \quad (1)$$

河道における洪水水面形の観測を河川流域を構成する山地各小流域の砂防河川まで広げることにより、そこでの水面形の時間変化より求めた各小流域からの流量ハイドログラフ群を観測位流量ハイドログラフで検証し、これより流域全体の水収支分布の算定と洪水流の解析を可能にしている^{1),15)}。

2.2 水文学と河川工学の研究成果をつなぎ流域水収支図を作成する.

わが国では河道での洪水対策と流域での雨水貯留等対策を一体として流域全体で氾濫被害を小さくする流域治水が進められている。流域における降雨の貯留と流出過程を考慮し、本・支川の洪水流の流出過程を流域水収支¹を流域治水の基本的考え方、技術に据え、検討するることが重要である。

それには、水文分野での山地及び河川上流域における降雨流出過程の調査研究成果と河川分野における中・下流域における洪水流の流下過程の調査研究成果に基づき、水文学と河川工学の調査研究成果をつなぐ水収支解析による流域水収支図の作成を行う。

流域水収支を表す基本式は式(2)で表される。

$$\frac{dS_{basin}}{dt} + \frac{dS_{dam}}{dt} + \frac{dS_{river}}{dt} = \frac{1}{3.6} R \cdot A - Q_{out} \quad (2)$$

ここで、 S_{river} を河道貯留量、 S_{dam} をダム貯留量、 S_{basin} を解析区間内の河道、ダム以外の流域での貯留量、 R は流域平均雨量(mm/hr)、 A は流域面積(km²)、 Q_{out} は流域から出ていく流量である。

2.3 豊平川流域における流域水収支の検討とその活用



図-3 豊平川流域図

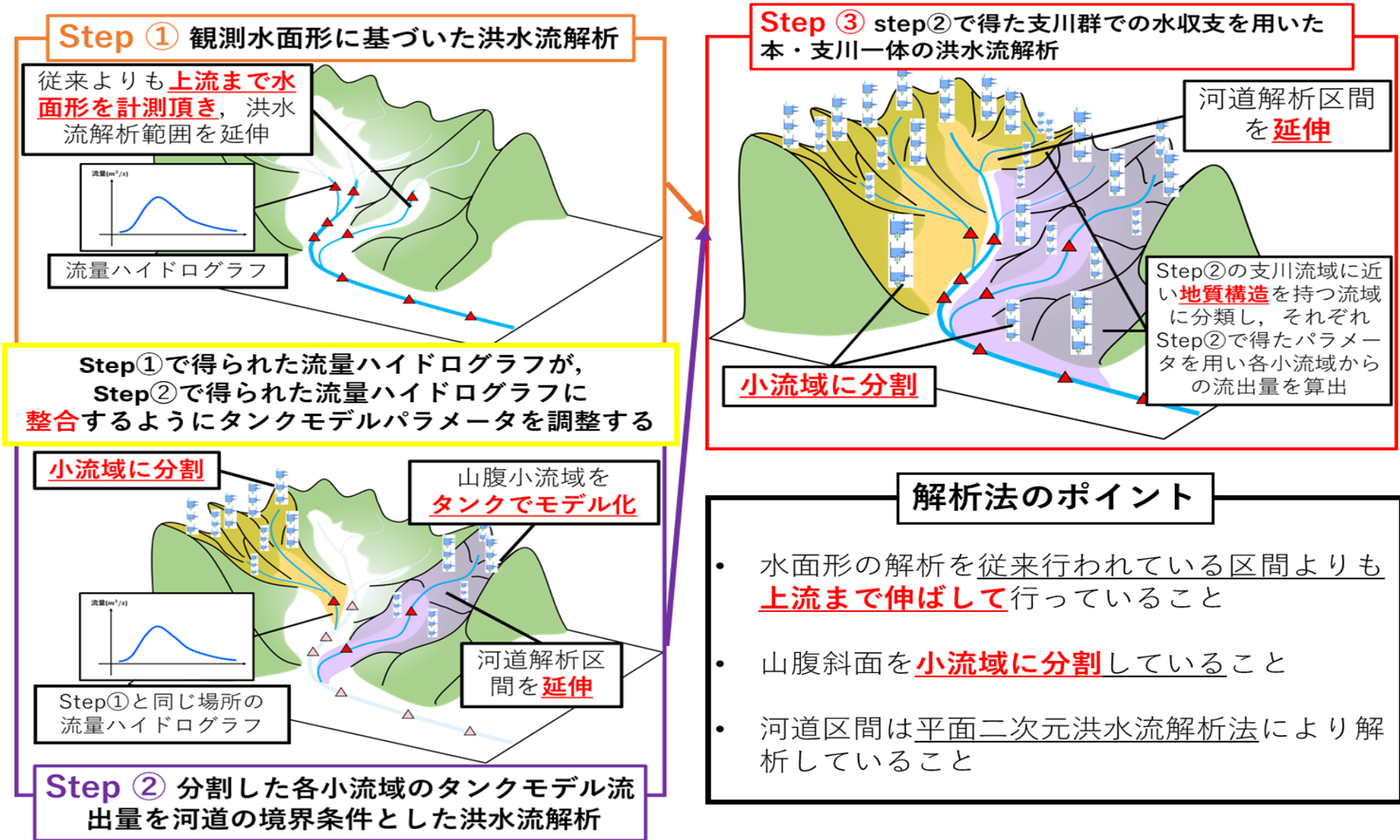
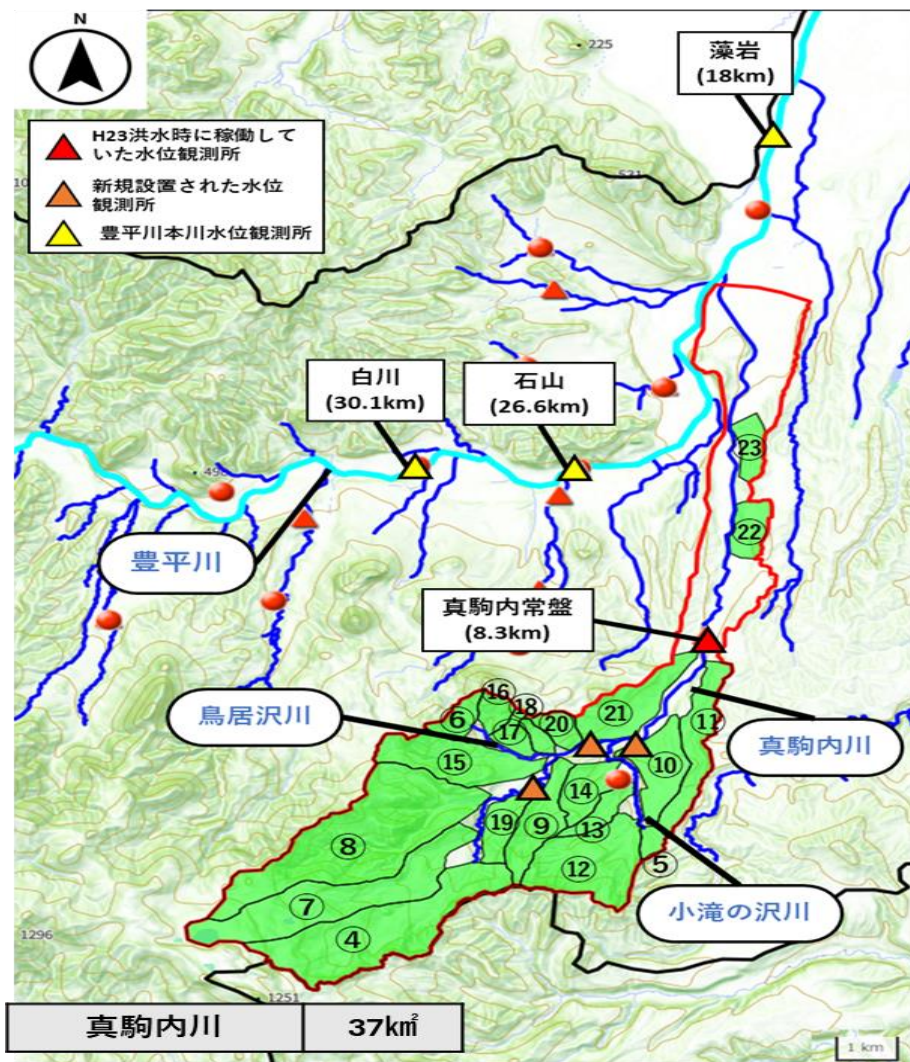
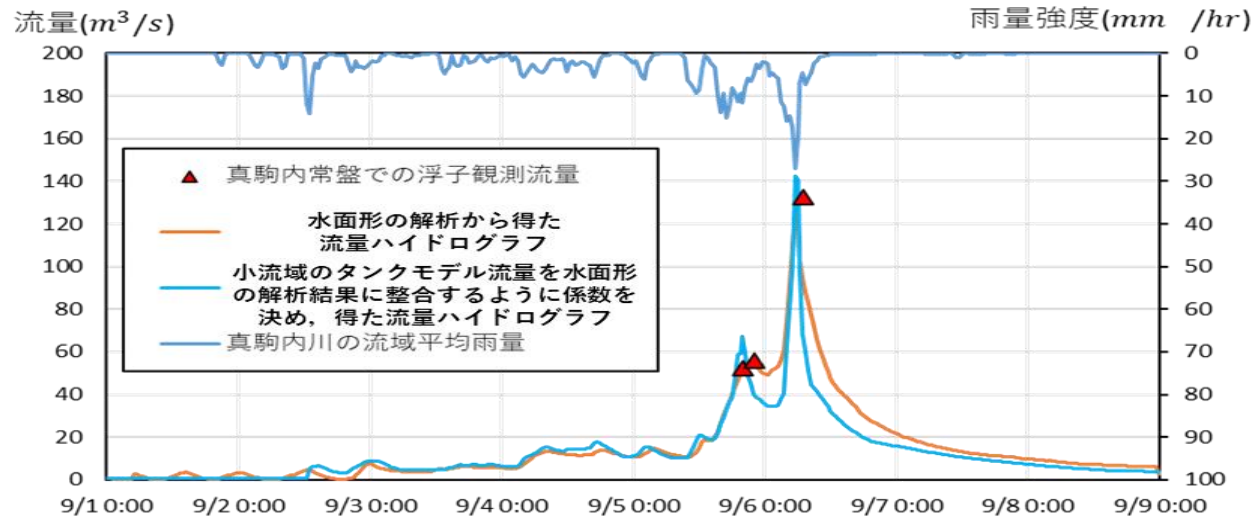


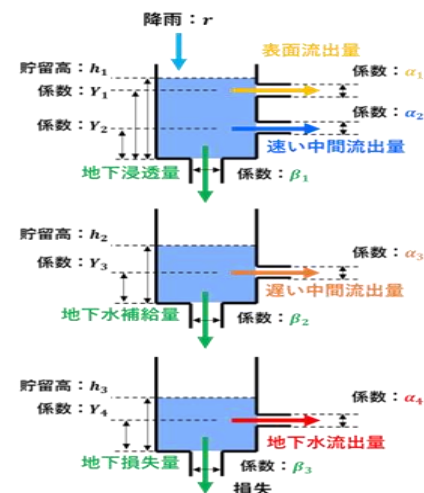
図-4 流域水収支解析法(Step①～Step③)



真駒内常盤地点での流量ハイドログラフの比較



真駒内川	流域面積(km ²)
④	4.22
⑤	0.23
⑥	0.56
⑦	3.79
⑧	5.10
⑨	1.39
⑩	1.45
⑪	2.41
⑫	0.59
⑬	0.94
⑭	1.96
⑮	0.56
⑯	0.43
⑰	0.05
⑱	0.67
⑲	0.54
⑳	1.55
㉑	1.65
㉒	1.55
㉓	0.57
平均値	1.51



係数	真駒内
α_1	0.8
α_2	0.15
α_3	0.08
α_4	0.03
Y_1	35
Y_2	9
Y_3	5
Y_4	5
β_1	0.12
β_2	0.04
β_3	0.005

図-5 真駒内川でのタンクモデル流出量を用いた解析(Step②)

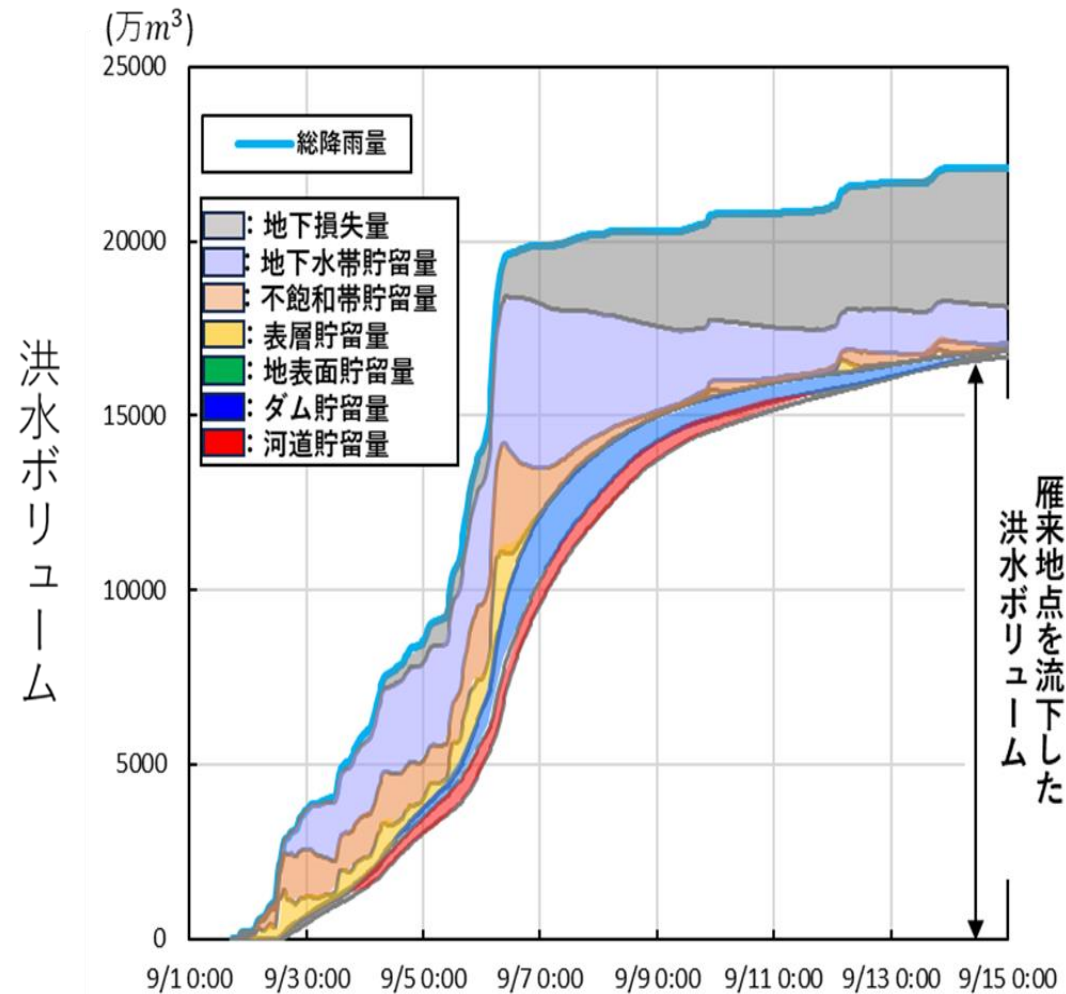


図-6 雁来地点(8.7km)より上流での豊平川流域水収支分布図

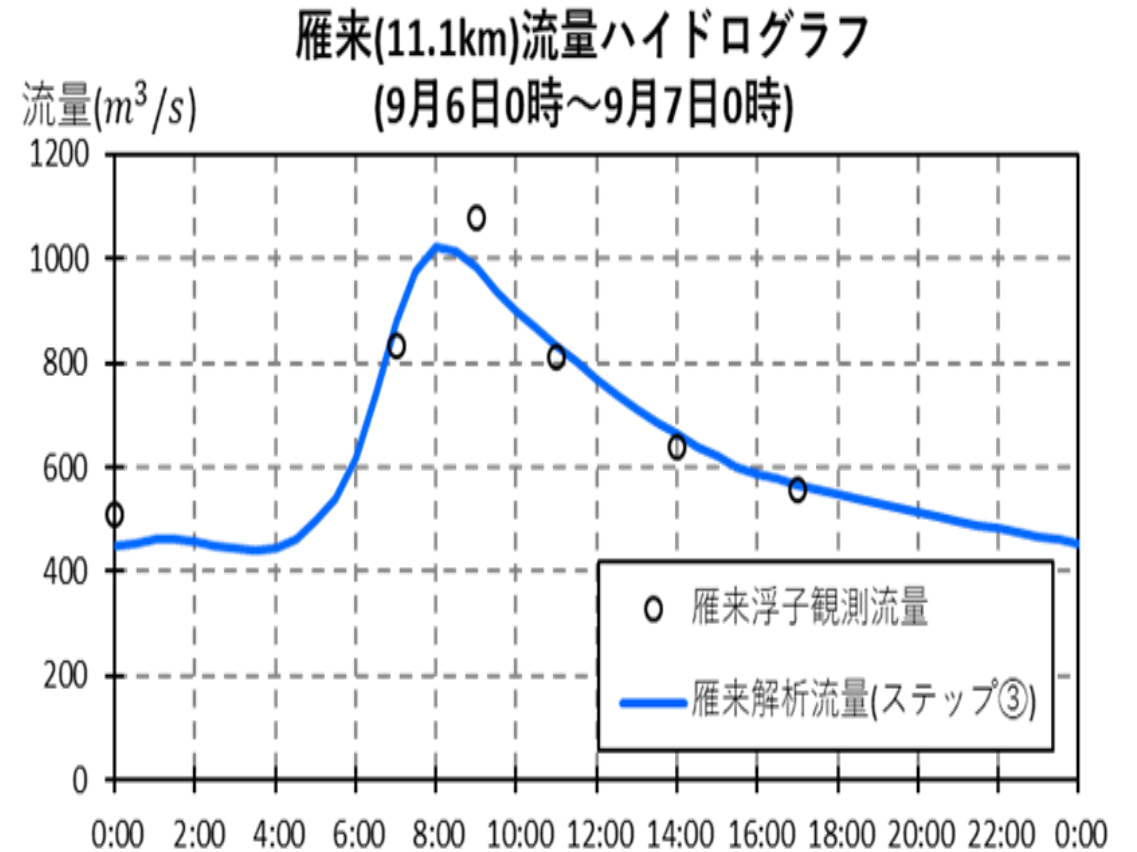


図-7 豊平川基準点雁来での流量観測値と解析値の比較

タンクモデル流量を用いた洪水流解析(ステップ②)で得られた水面形の時間変化(1km～16kmを抜粋)

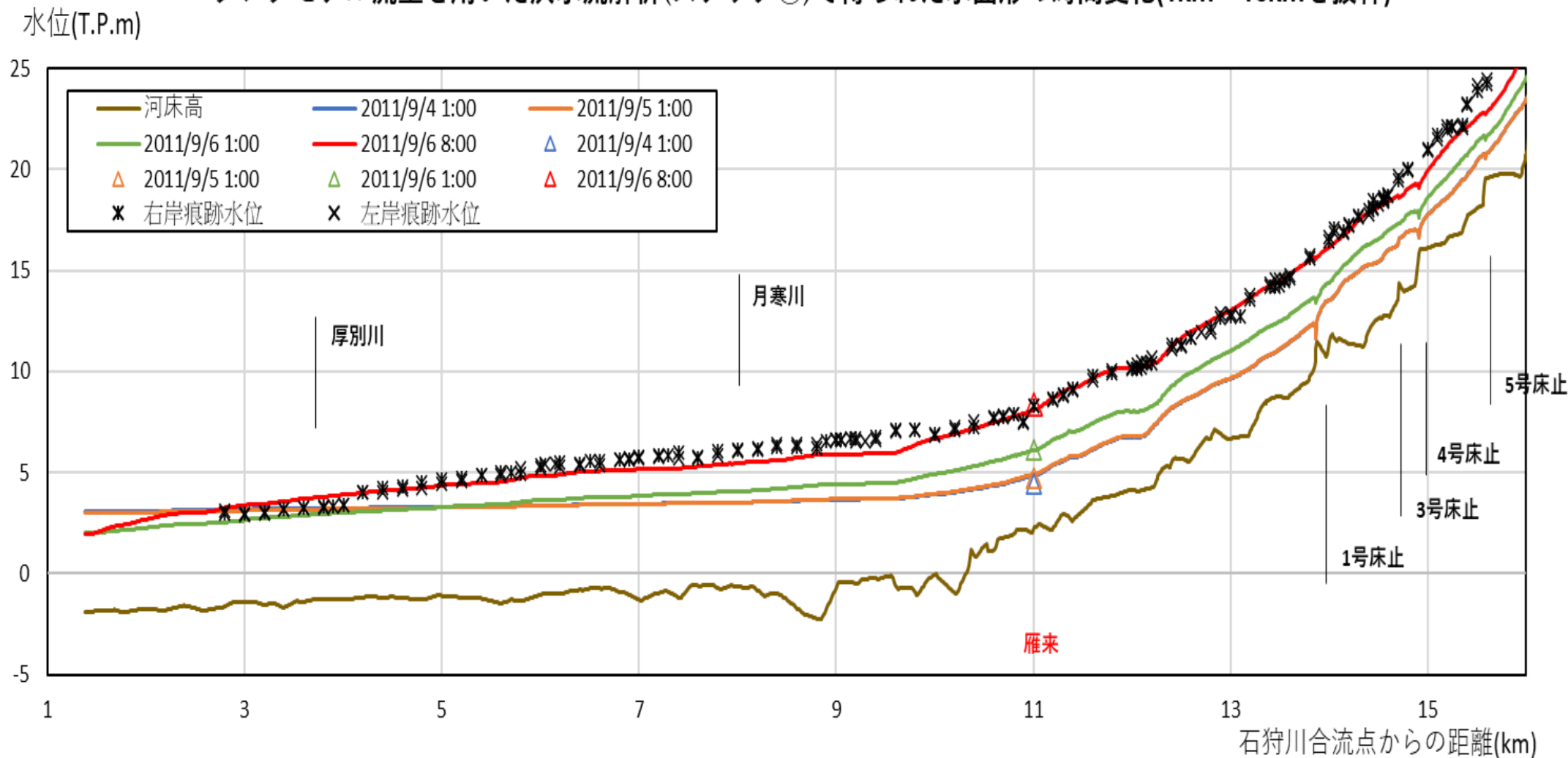


図-8 タンクモデル流量を用いた豊平川の洪水流解析 (Step②) で得られた解析水面形 (1km～16km区間の時間変化) の実測値との比較

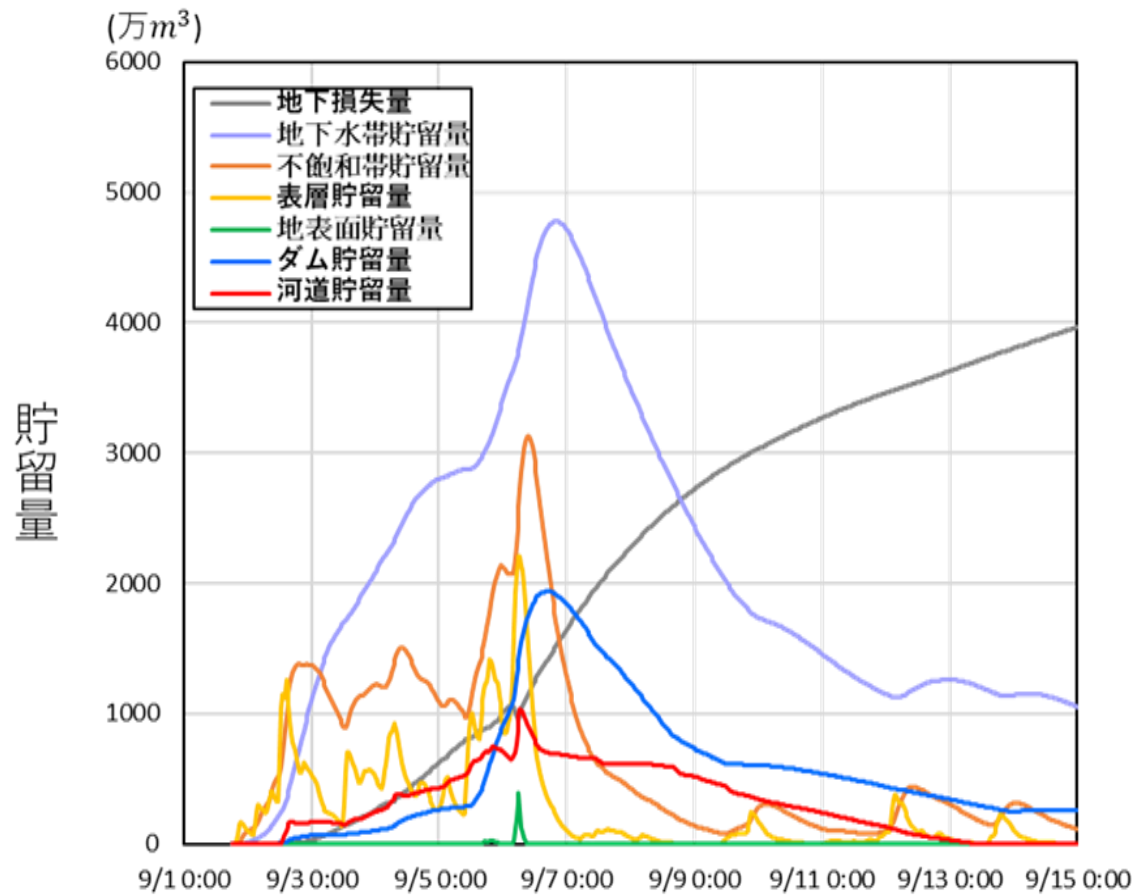


図-9 雁来地点(8.7km)より上流流域での貯留量の時間変化

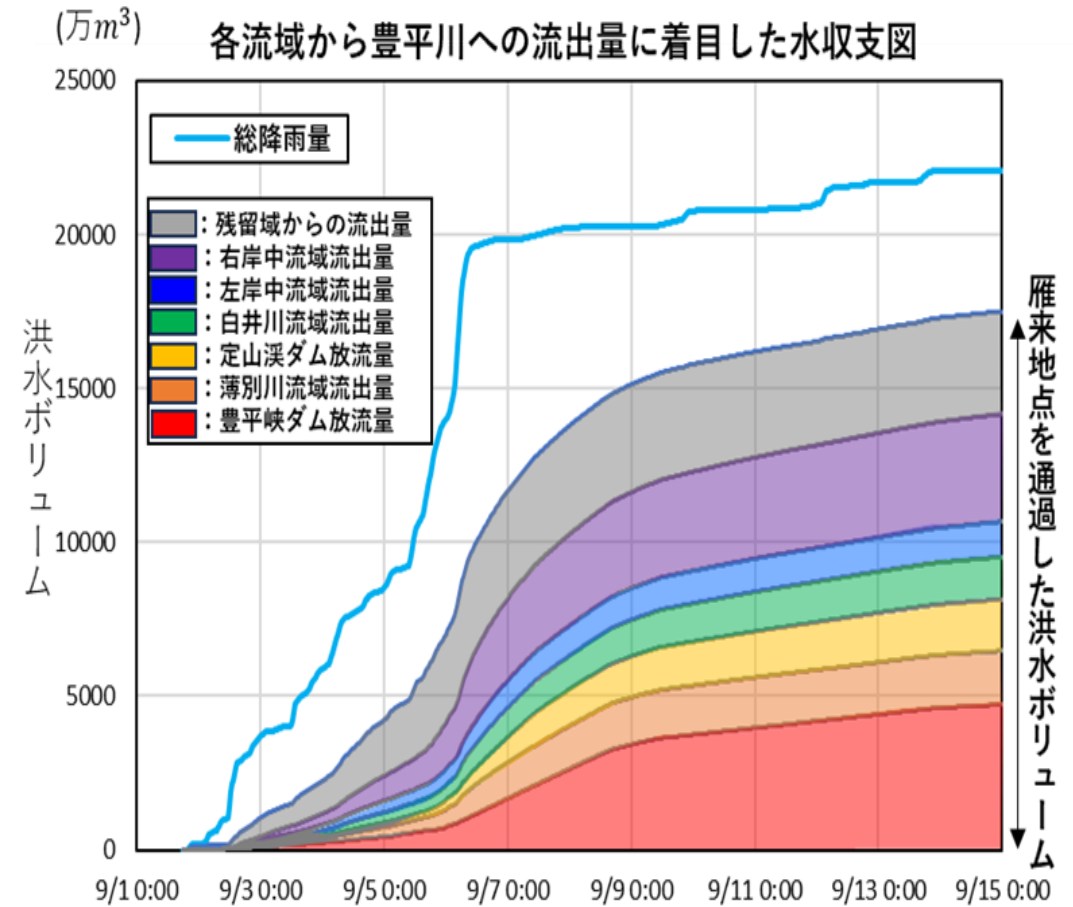
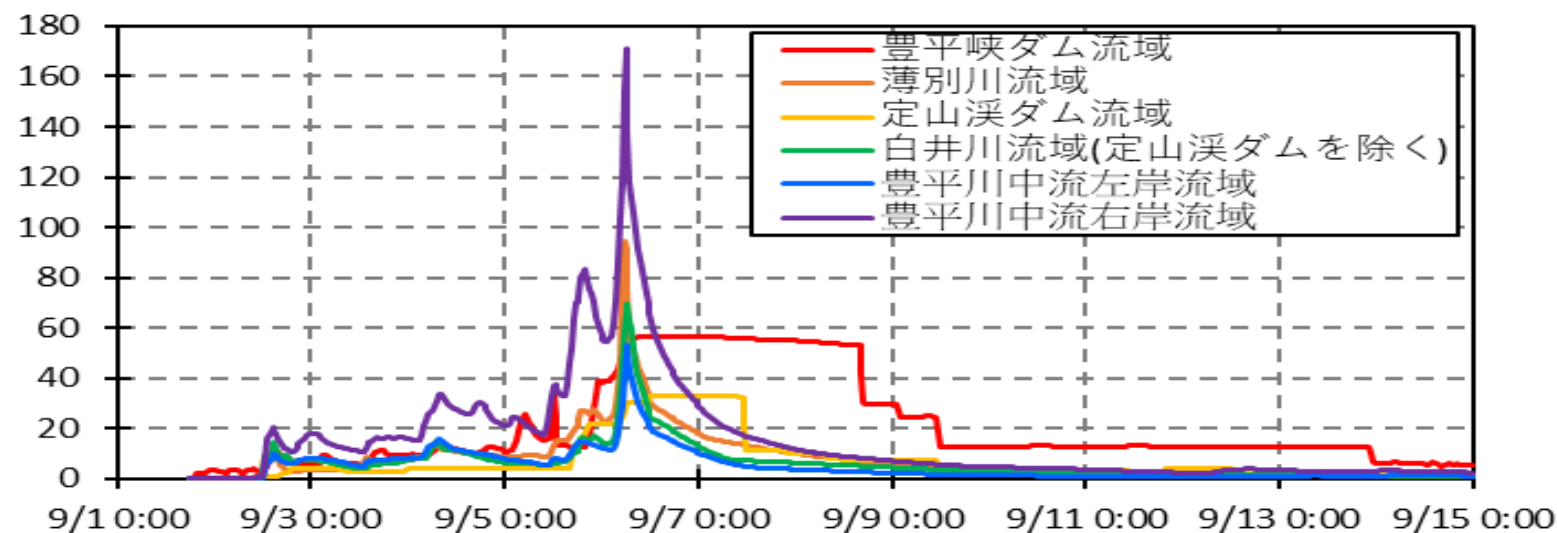


図-10 豊平川流域水収支図を用いた総流出量に対する各流域から雁木地点を通過する総流出量の関係

流量(m^3/s)各流域から豊平川本川への流入量の時間変化



各流域から豊平川本川への流入量の時間変化拡大図
(9月6日0時～9月7日0時)

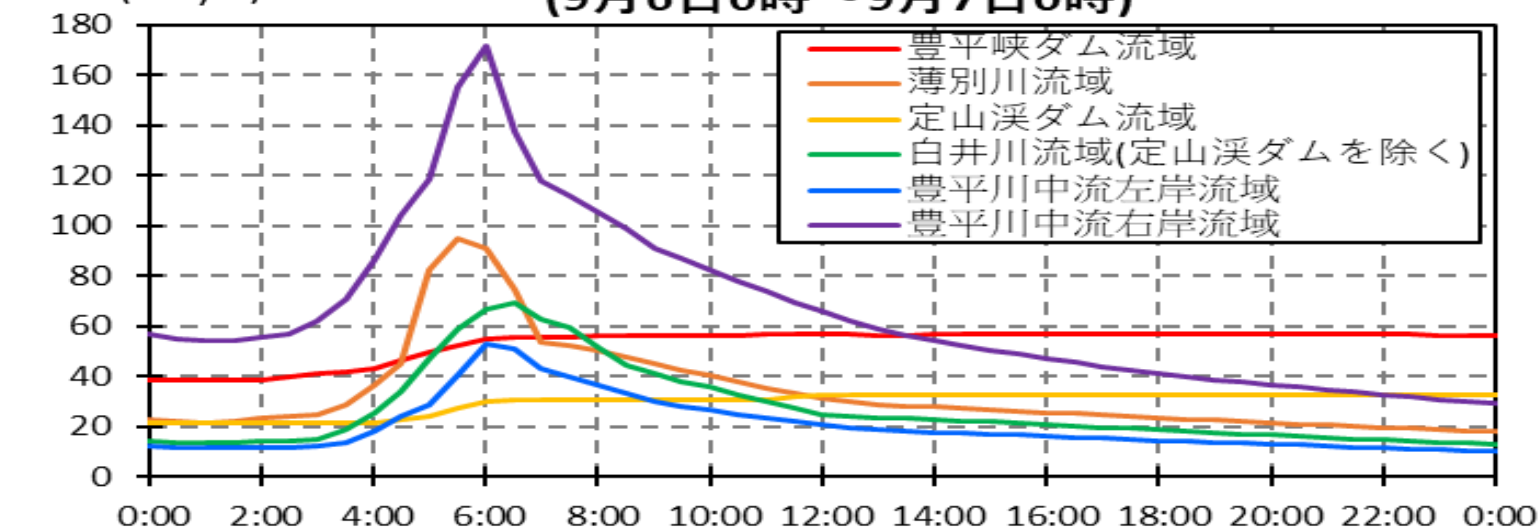


図-11 各流域から豊平川本川への流入量の時間変化

2.4 流域水収支図を流域治水の技術の中心として活用

これらの解析により流域治水に対する流域水収支図から得られる貴重情報が明らかとなった。

1. 山地流域を平均1.5km²小流域に分割し、小流域にタンクモデルを適用し、多点水位計による水面形の時間変化から求めた河川の流量ハイドログラフに一致するようにタンクモデルのパラメータを決めた。これから求まる小流域からの流量ハイドログラフを用いて、流域全体の水収支図を求める方法とその活用を示した。
2. 他の豪雨条件に対してタンクモデルのパラメータについて検討した。その結果、豪雨ごとのタンクモデルパラメータの変動が小さく安定したパラメータが得られた。この理由は流域を小流域に分割したこと、河川の水位データを多く使って山地貯留・流出の精度を高めたことにある。
3. 流域の豪雨分布から洪水流の水面形の時間変化（図-8）任意地点の流量ハイドログラフ（図-7）が精度良く求まり、さらに流域水収支解析が、以下に示すように（図-6, 図-9, 図-10, 図-11）流域に降った雨の貯留、排出過程を適切に説明できるモデルとなっていることから、本手法が計画降雨に対する治水計画の策定に有効な方法となることを示した。
4. 図-6, 図-9はそれぞれ、雁来地点より上流域で豪雨がどのような状態で貯留されているか、それぞれの状態における貯留量の時間変化を示す。図-10, 図-11はそれぞれ、総流出量に対する各流域から雁来地点を通過する総流出量と各流域からの豊平川本川への流入量ハイドログラフを示している。

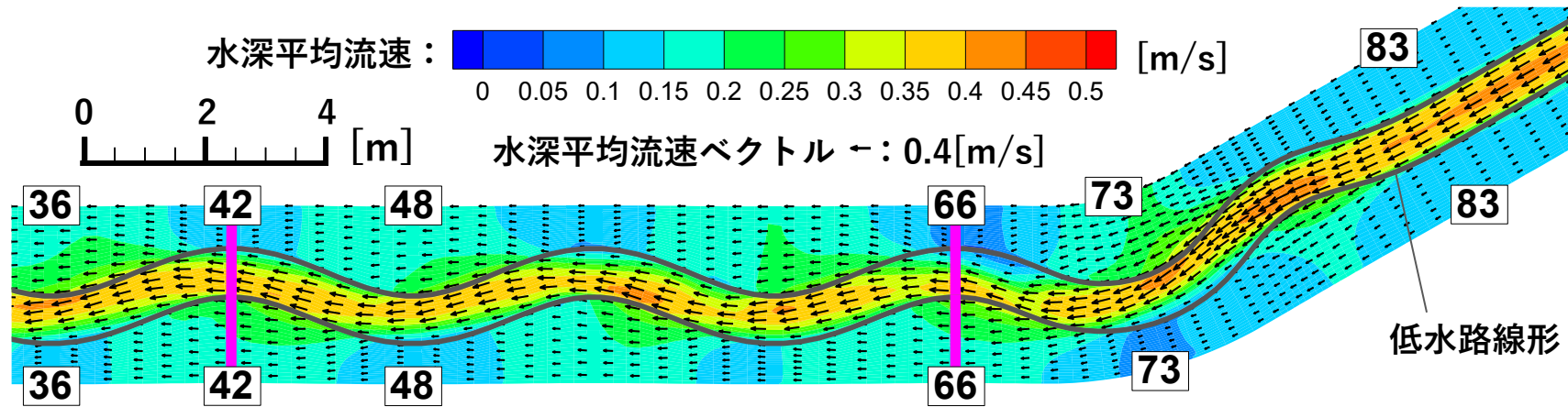
3. 複断面蛇行河道における超過洪水時の流れの構造と砂州の変形

図-1, 図-2に令和2年の球磨川における洪水流の氾濫状況を示した。この洪水はあたかも河道を低水路とし、市街地を高水敷とするような複断面蛇行河道のような流動を示し、Q3D-FEBSのような三次元的解析でないと氾濫現象を十分に再現し得なかった。

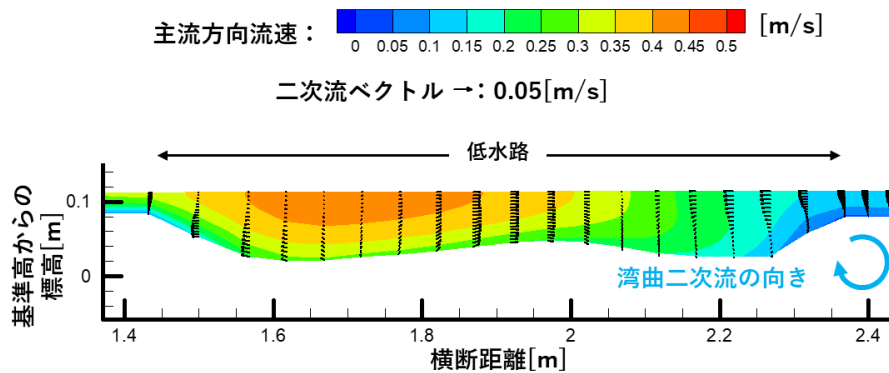
図-12は、縦断的に断面が変化する複断面蛇行水路であり、この水路に相対水深（高水敷水深/低水路の全水深）が0.4の流れを与えたときの三次元的流れの解析結果を示す。流れの解析結果は実験で得られた流速分布や水面形をよく説明している。図中の水深平均流速のベクトル分布をみると、高水敷流れが低水路の早い流れと混ざり合い、また低水路流れが高水敷へと出ていき、そこでの遅い流れと混合する状況が見られる。この混合が、遠心力に起因する反時計回りの二次流場を、断面全体または局所的に時計方向に回る二次流場を生起している。この遠心力による二次流の変形の程度は、洪水流量、堤防と低水路の縦断的な位相差、高水敷の広さと低水路断面形の変化等に関係する。

図-13はこのような流れの縦横断変化が、複断面蛇行流れと単断面蛇行流れに対して、河床に現れる砂州の大きさ、分布の違いとなって河床の形に現れている。単断面蛇行流れは遠心力に起因するに二次流が卓越しているが、複断面蛇行流れでは、高水敷流れが低水路に移流混合することに伴う時計回りの二次流が遠心力による二次流と共存する場となっている。

図-12 縦断的に断面が変化する複断面蛇行流れの構造



断面42



断面66

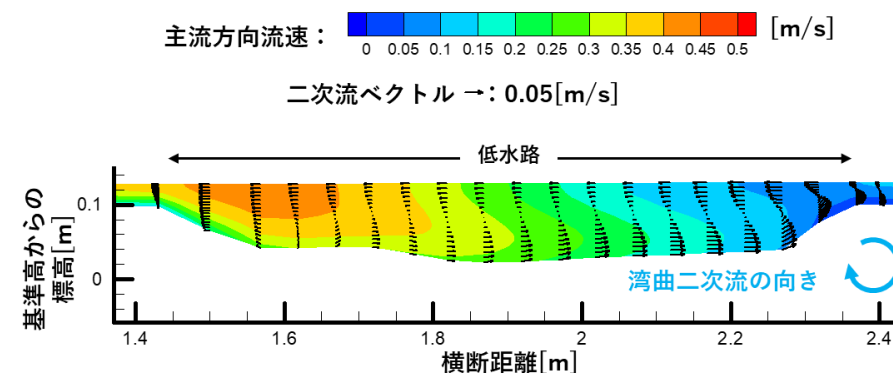
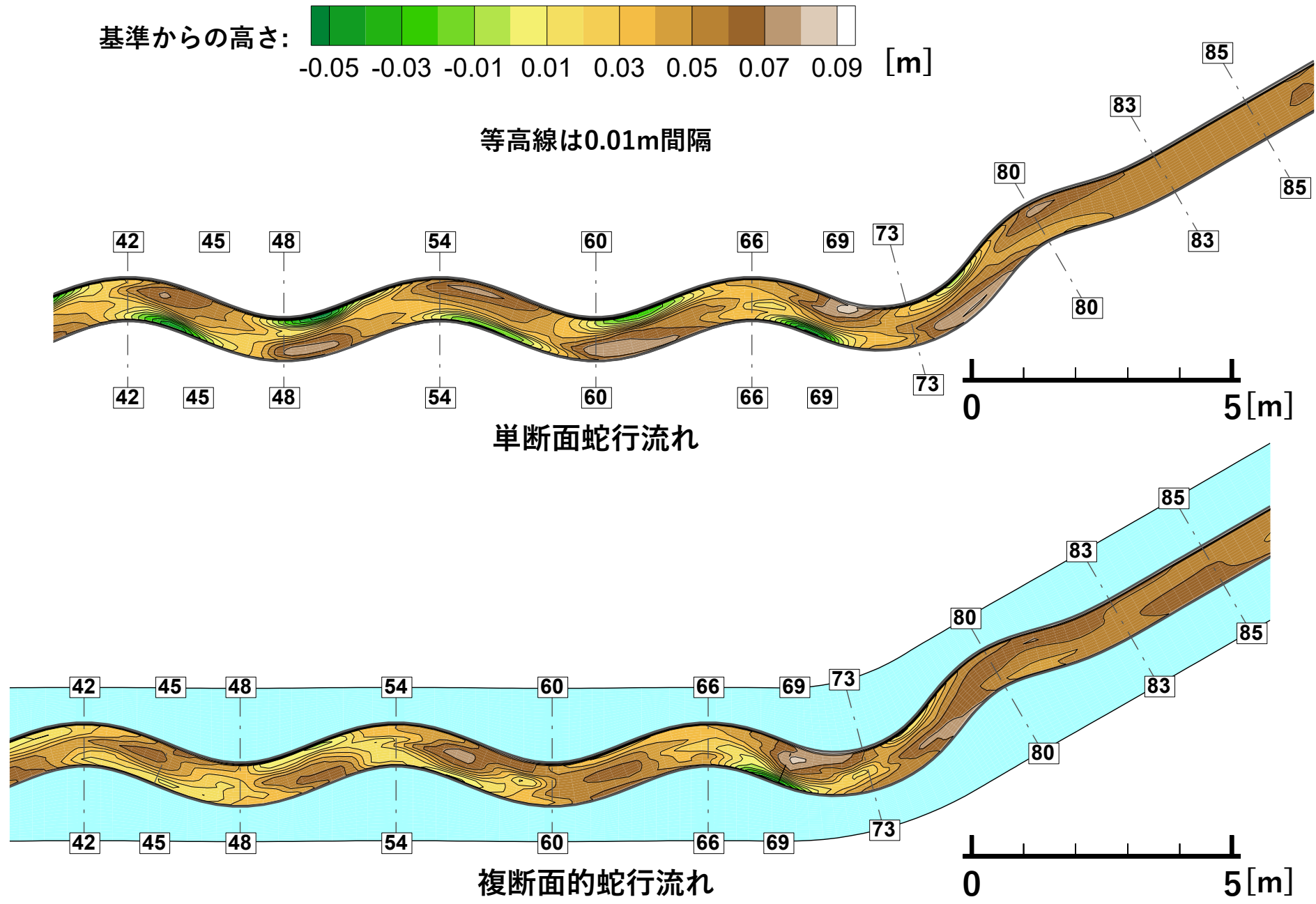


図-13 単断面蛇行流れと複断面的蛇行流れの河床形状の違い



4. 洪水流のエネルギー分布の重要性とその評価法

近年、河川水位が堤防天端高さに匹敵、時には越流する規模の洪水が発生している。これは、河道の洪水流下能力不足が主要な要因であるが、加えて3. で述べた洪水水位の増大と河道の平面形、縦横断面形の変化に起因して生じる三次元水理現象が関係している^{14), 21)}。これは、近年の大洪水流で明らかになった技術的知見であり、超過洪水流に対する堤防と河道の設計法の見直しが必要である。

洪水時の水面は流速が速く運動エネルギーを持って流れている。水面上には見えないが、水面の高さに運動エネルギーが加わったエネルギー水頭の面があり、この面が洪水水位を連ねた水面形とともに洪水流は力学現象の基本である。

河道は流下方向に大きな勾配を持っていることから、洪水流の全エネルギー水頭の流下方向の勾配で流れている。河道や河川構造物の管理を行う上で全エネルギー水頭は水位とともに最も重要な高さであり堤防や河道の計画、設計では十分に考慮されなければならない²¹⁾。

全エネルギー水頭は洪水時の水位・河床高に速度水頭と圧力の非静水圧水頭を加えた水理量であり、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^{21)~23)}。洪水の三次元エネルギー水頭 $H(x, y, z, t)$ が式(3)で定義されることから、洪水の全エネルギー水頭 $H_{all}(x, y, t)$ は、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得られる。その時の流速の3成分や圧力水頭、位置水頭は、準三次元洪水流解析(Q3D-FEBS)⁶⁾等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(4)で評価される。

$$H(x, y, z, t) = \frac{u^2(x, y, z, t) + v^2(x, y, z, t) + w^2(x, y, z, t)}{2g} + \frac{p(x, y, z, t)}{\rho g} + \hat{z} + z_b(x, y, t) \quad (3)$$

$$H_{all}(x, y, t) = \frac{1}{h(x, y, t)} \int_{z_b}^{z_s} H(x, y, z, t) dz \quad (4)$$

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 は圧力で静水圧と動圧の和、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 h は水深、 z_s は水面高、 $\hat{z}$ は河床高 z_b を基準とした高さである．したがって、式(3)、(4)より洪水流の全エネルギー水頭の時空間分布には、河床高 $z_b(x, y, t)$ の時空間分布の変化、すなわち、図-13で見られた複断面蛇行流れの河床の砂州の高さの変化と関係する．

これまで、私たちは洪水流の問題を考える際に流れの運動方程式を用いて洪水の流下能力を検討し、土砂移動による河床変動量、特に、河床洗掘を問題視してきた．これは河床洗掘が護岸や床止め等の構造物の維持に大きく関係するためである．しかし、超過洪水のような大規模洪水流では土砂移動が激しくなり、特に砂州の移動、変形が活発化する．式(3)、(4)によれば、**全エネルギー水頭の増加には**、砂州の移動、変形等による河床高の上昇分 $z_b(x, y, t)$ が重要な量となることが分かる．

5. 洪水流のエネルギー分布から見た令和元年多摩川大洪水による被災とその原因

- ・洪水流は計画高水位（HWL）を超え、場所によっては堤防天端を越流するほどの超過洪水流であった。堤防表のり面の侵食、高水敷の洗掘、橋脚等構造物の被災が多く、の地点で発生した。
- ・洪水時に被災箇所については従来より考えられてきた場所と大きくは異ならないが、その原因を近年確立されてきた解析手法を用い明らかにした。
- ・Q3D-FEBSに基づく準三次元解析と三次元エネルギー式(3) (4) から、時間的、場所的に変化する洪水流の全エネルギー水頭分布を求め図示し、エネルギーの集中を起こしている場所はどのような特性をもつ場所であるか、なぜエネルギー集中を起こし、被災を受けた危険箇所となったのかを調べた。
- ・蛇行する低水路内で洪水中に起こっている砂州の動きと砂州の大きさの変化がエネルギーの集中と密接に関係しており、洪水中の堤防や構造物の安全性の検討には低水路の流れと河床の動きについて高精度な解析とそれに基づくエネルギー的考察が必要なことが改めて明らかになった。
- ・低水路が堤防に近づく箇所は洪水時の水衝部となること、また、河川を横断する構造物（橋脚、堰・床止め等）が三次元エネルギー分布を大きく変化させ危険箇所になること、といったこれまで経験的に明らかになっていたことをエネルギー的に考察することによって明確化し、堤防と河道の一体設計の必要性を示した。

図-11 多摩川令和元年10月洪水における水位・洪水全エネルギー縦断分布

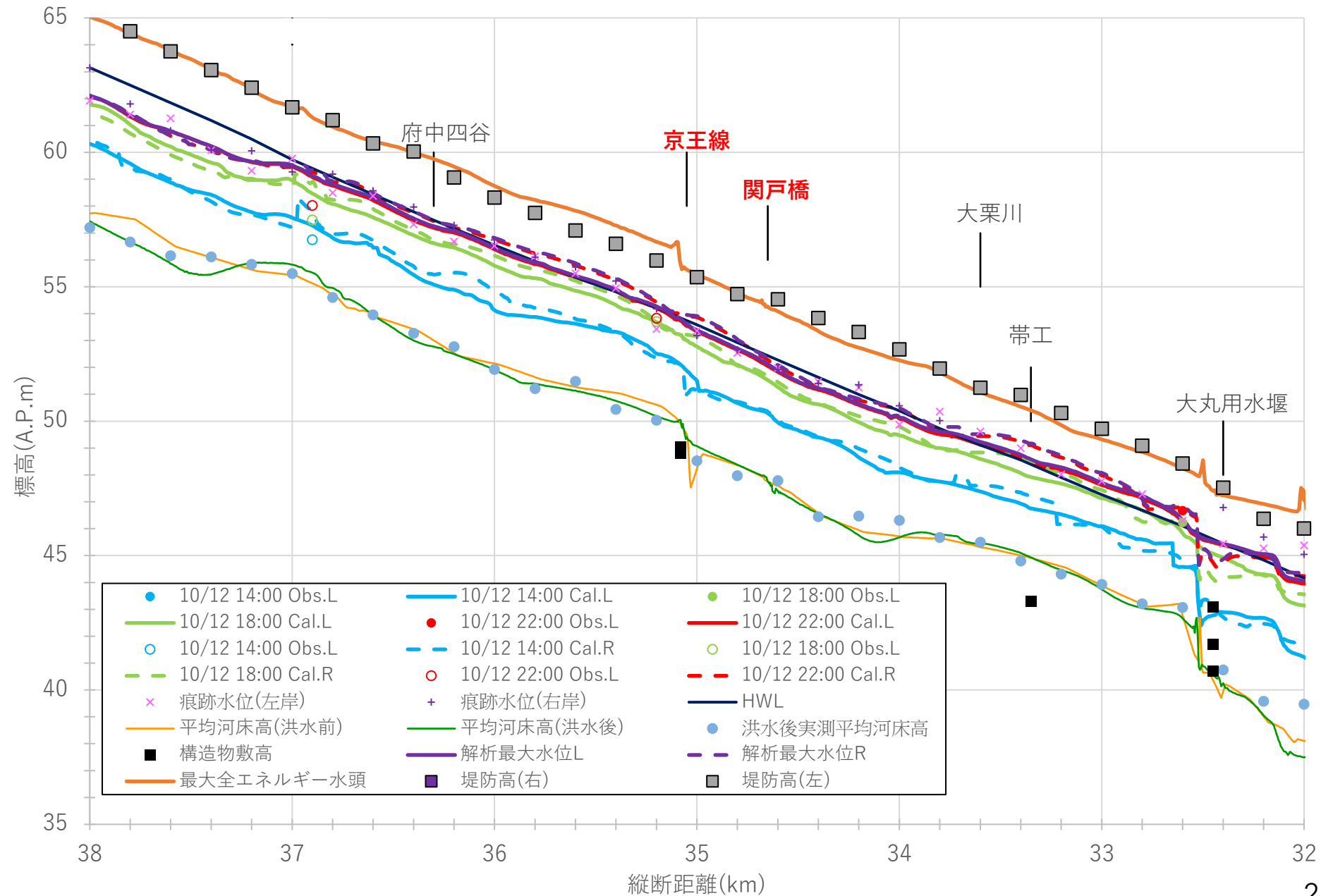
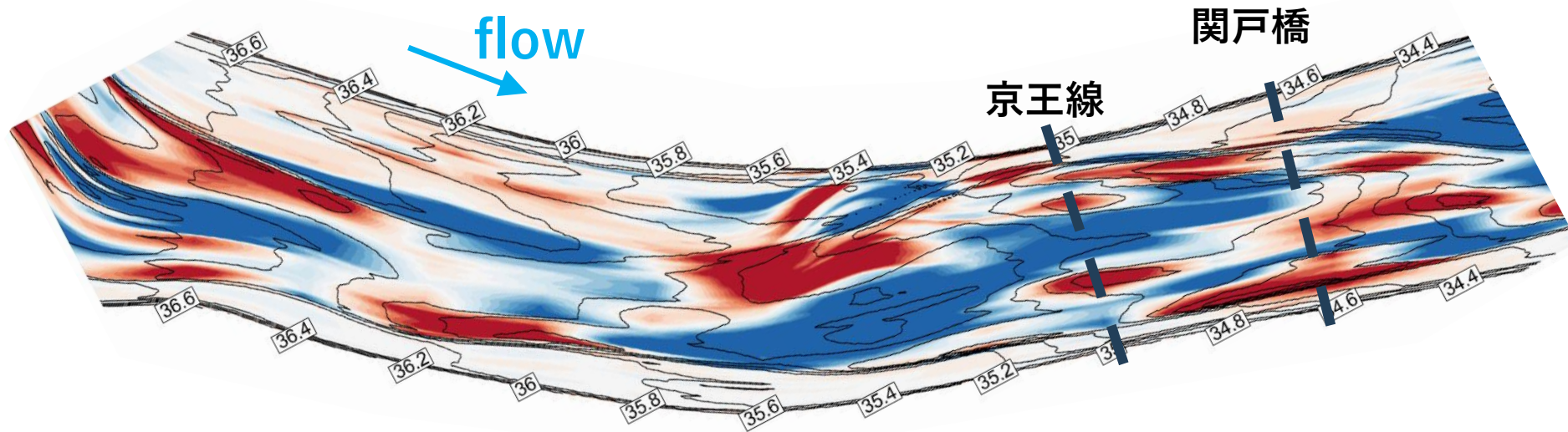


図 - 12 洪水前後の実測と解析の河床変動コンターの比較(京王線・関戸橋)

実測河床変動コンター



解析河床変動コンター

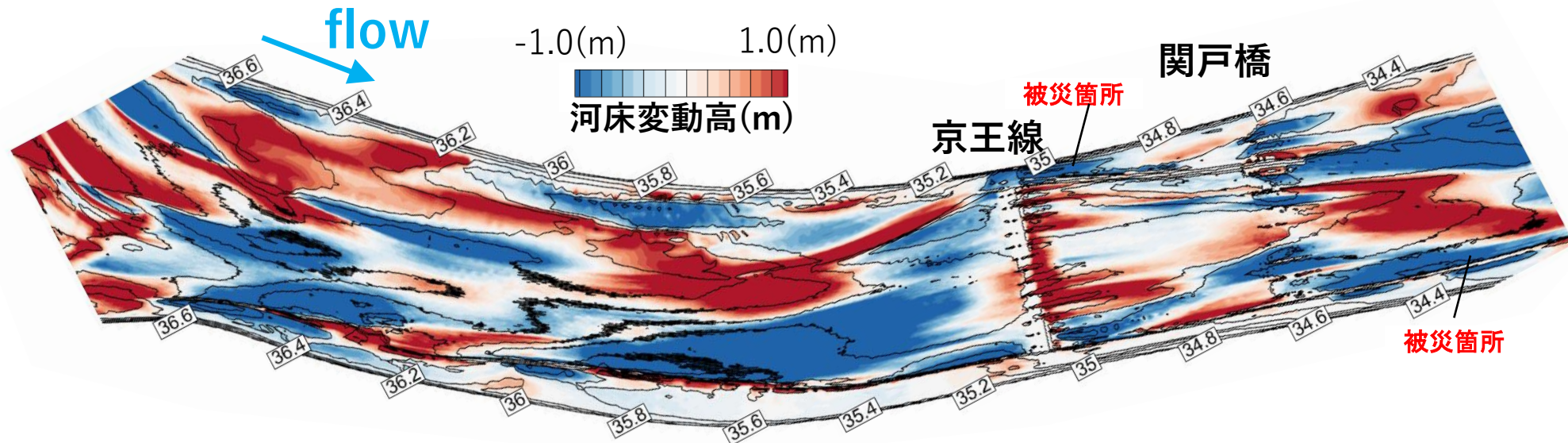


図 - 13 令和元年10月洪水における京王線多摩川橋梁の被災状況

洪水前(R1.4)



洪水後(R1.11)



洪水後
左岸高水敷
上流向きに撮影

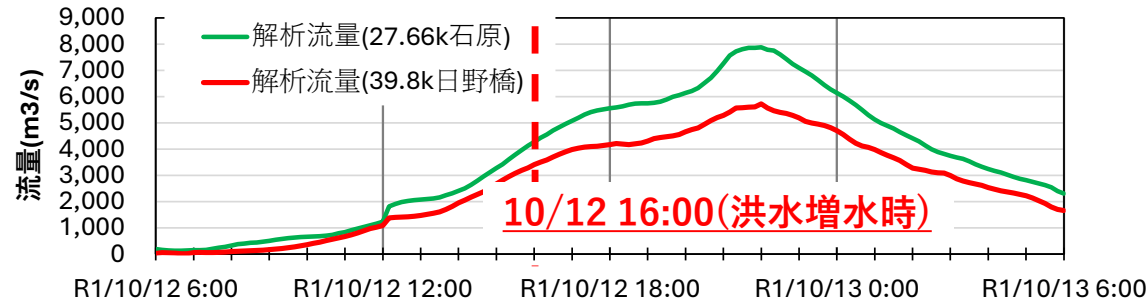
図 - 12 令和元年10月洪水における京王線多摩川橋梁の被災状況(35km)



令和元年10月洪水における京王線多摩川橋梁の被災状況(35km)

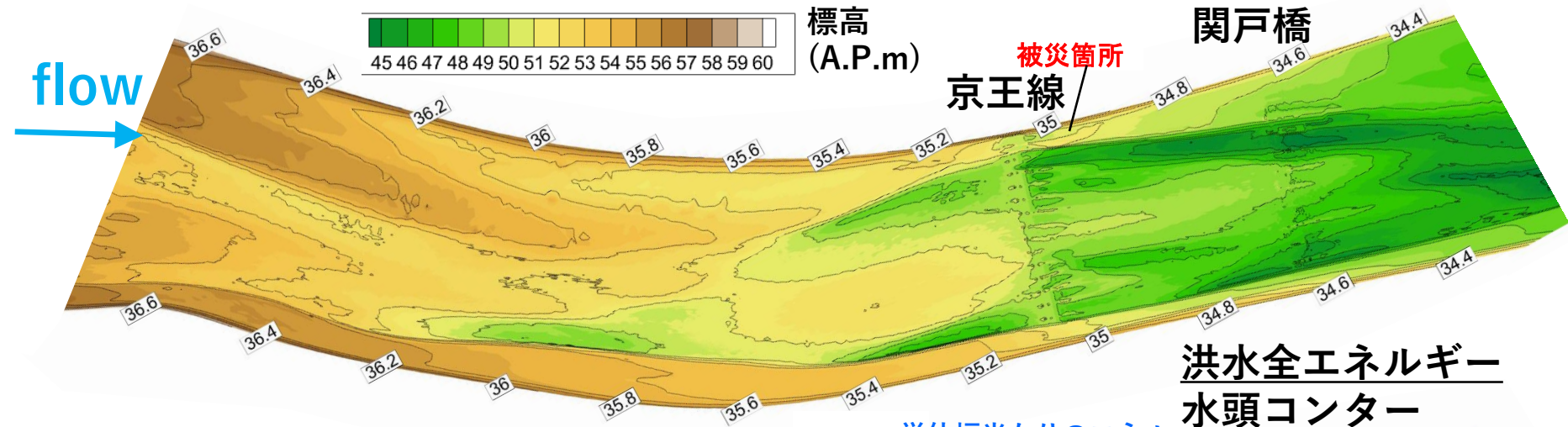


砂州の移動に伴う洪水全エネルギー水頭とその輸送フラックス(京王線周辺)

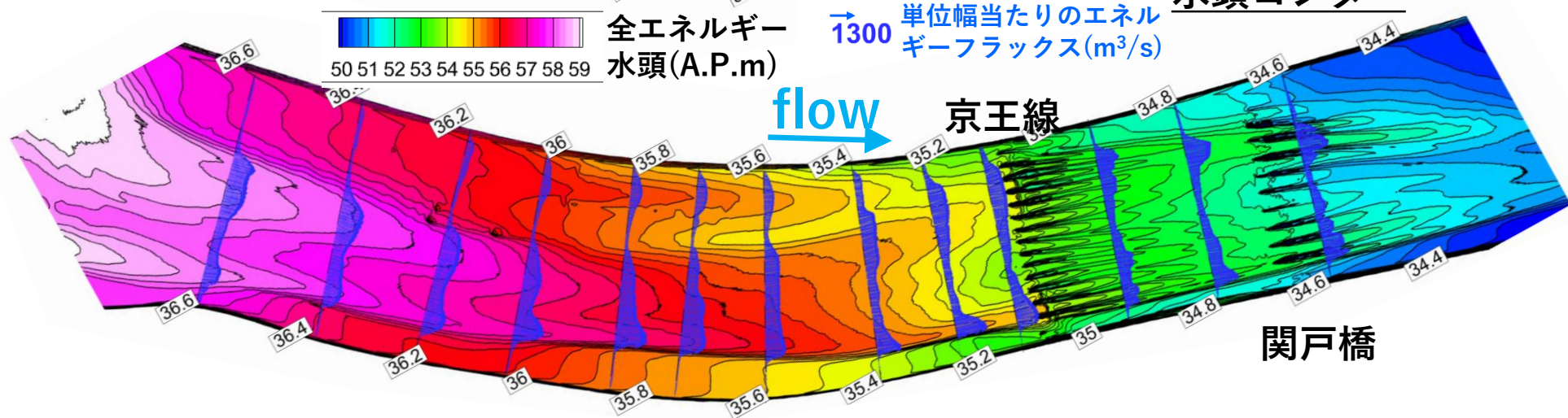


高水流量(石原): 7,400(m³/s)
(6,500(m³/s) R1当時)

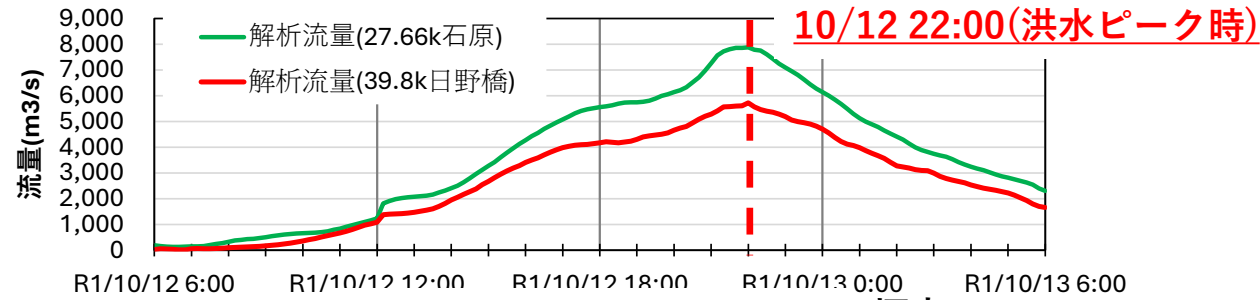
河床高コンター



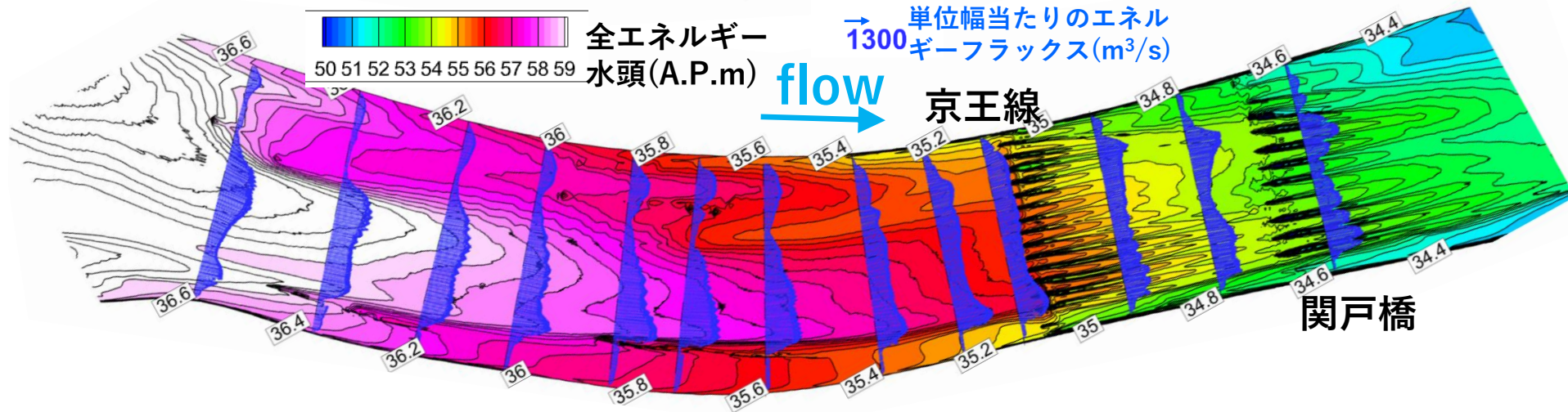
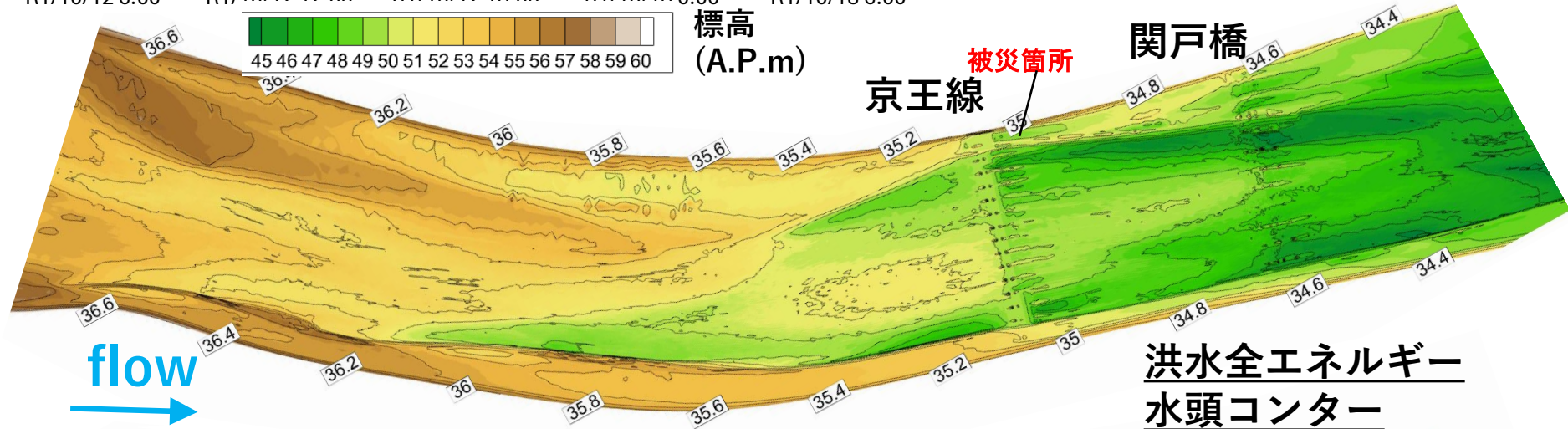
洪水全エネルギー 水頭コンター



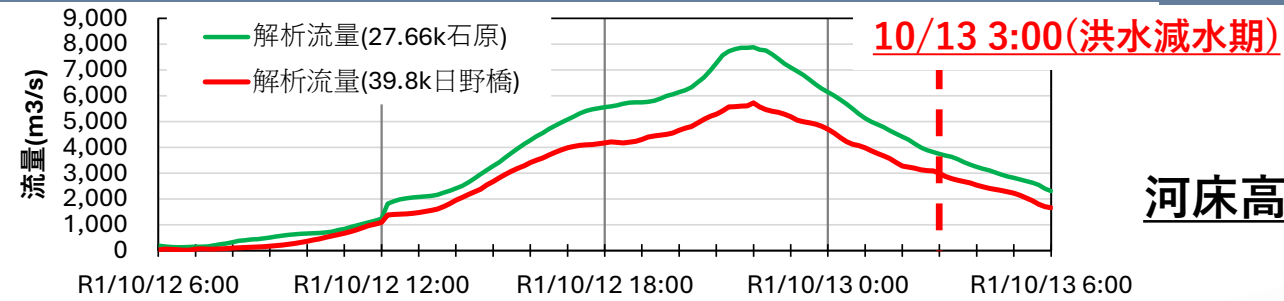
砂州の移動に伴う洪水全エネルギー水頭とその輸送フラックス(京王線周辺)



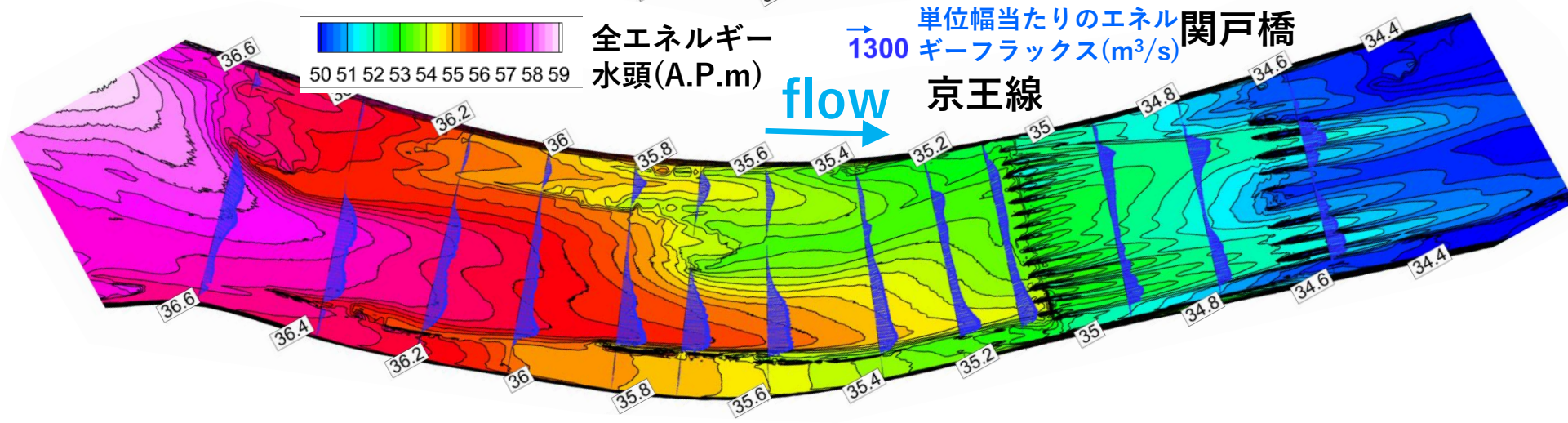
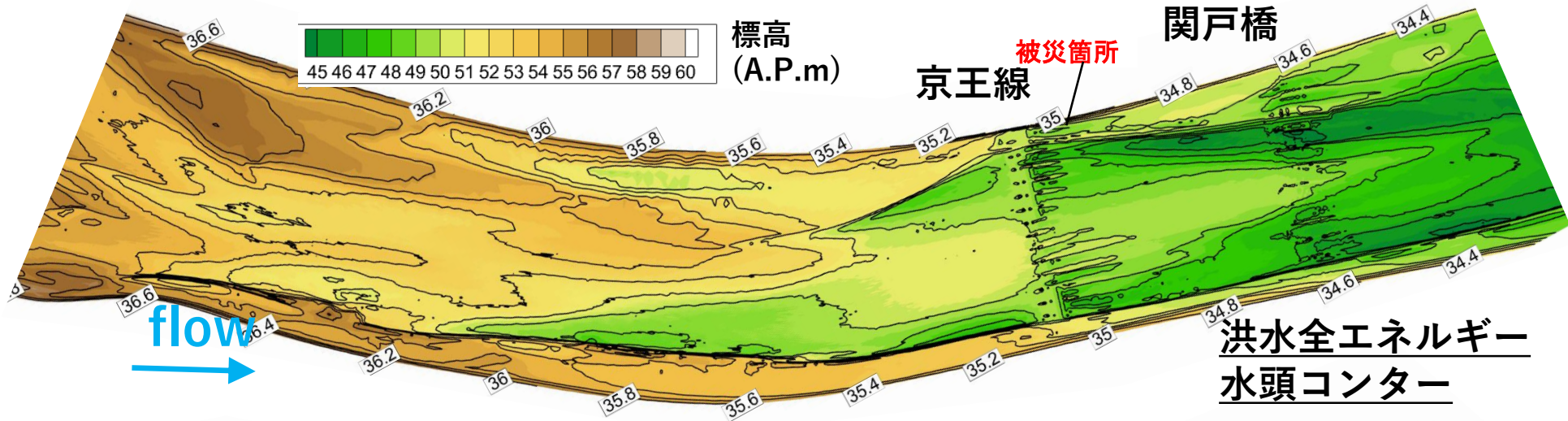
河床高コンター



砂州の移動に伴う洪水全エネルギー水頭とその輸送フラックス(京王線周辺)



河床高コンター



6. 信濃川支川五十嵐川における超過洪水時の高水敷及び堤体表のり面の洗掘発生と堤防天端高さを超える全エネルギー水頭の関係

超過洪水時には、HWL以上となった流れが堤防の余裕高部に生じ、また低水路の蛇行や河川構造物の存在等により水流が集中する強い水衝部が現れ、時には堤防の侵食、天端からの越流を引き起こす。低水路河岸、高水敷河床の侵食が起こっている場所では、さらに洪水エネルギーが集中すると堤防侵食となり、破堤の危険性が高くなる。

図-14は平成23年新潟・福島豪雨における信濃川支川五十嵐川における洪水災害の状況を示す。図-15は五十嵐川の平成16年、平成23年洪水による洗掘被害を受けた区間の全エネルギー水頭分布を区間内で求め、それらの区間平均値の全エネルギー水頭と堤防の高さとの差に対し堤防表のり面や、高水敷河床の洗掘被害延長の関係を示している²⁵⁾。

水衝部、蛇行部外岸、内岸寄りや、橋梁の存在等によって、堤防や高水敷の侵食長さがどの程度変化するかに着目して検討している。平成16年の堤防破堤を受けて、平成23年洪水時には堤防のかさ上げと強化がなされていた。平成23年洪水水位は平成16年洪水よりも高くなったが、対象区間の堤防は破堤しなかった。しかし、高水敷及び堤防表のり面は損傷を受けている。全エネルギー水頭の値は流量、全川幅、低水路の線形や高水敷幅、橋梁の影響等によって異なる。

今後、超過洪水が発生した多くの河川について、洪水全エネルギー水頭に対する堤防天端の高さや河道特性と被災個所の関係を調べ、堤防の危険個所や破壊形態についてさらに理解を深めていくことが大切である。



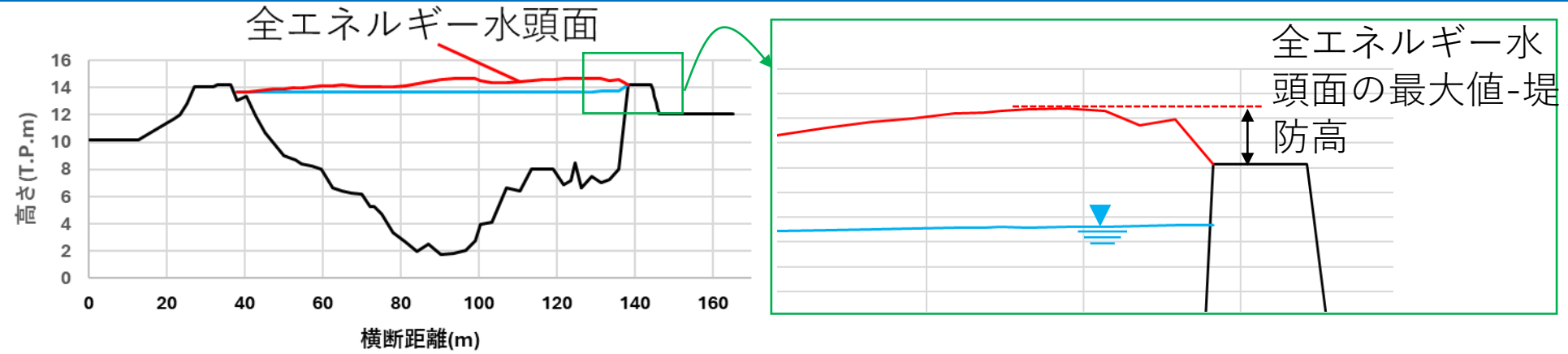
(a)内岸高水敷洗掘・低水護岸破壊（1.1km内岸）



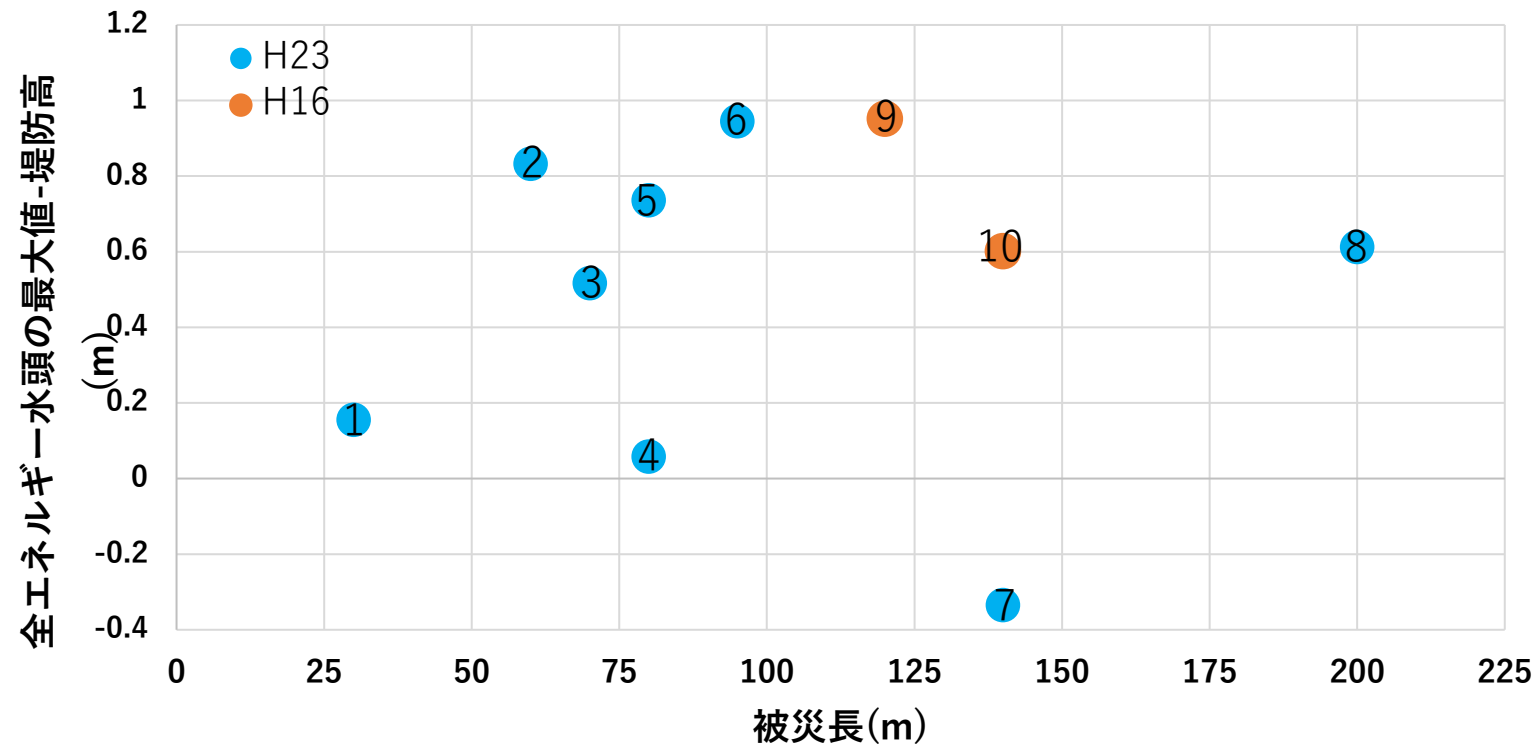
(b) 外岸表のり面侵食（3.4km外岸）

図-14 平成23年（2011年）7月新潟・福島豪雨による河道被害の状況

図-15 五十嵐川の（全エネルギー水頭の最大値－堤防高）と被災長の関係



被災箇所②における横断面・全エネルギー水頭の横断分布



番号	被災内容	場所
①	高水敷洗掘	蛇行部外岸 (0.9km)
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 (0.6km)
⑤	高水敷洗掘	蛇行部外岸 (2.3km)
⑥	堤防侵食	蛇行部内岸 (2.3km)
⑦	高水敷洗掘	河道直線部 (6.6km)
⑧	高水敷洗掘 堤防覆土流出	蛇行部外岸 (1.5km)
⑨	破堤	蛇行部内岸 (3.3km)
⑩	高水敷洗掘	河道直線部 (6.6km)

堤防の破堤原因には、前述の越流破壊や堤体侵食破壊の他に浸透水による破堤がある。平成16年の五十嵐川の破堤原因調査の委員会報告によれば、破堤の主因は越流による裏法面等の浸食等であるとしているが、長時間にわたりHWLを越えた流れにより浸透水による弱体化も関係している可能性を述べている。福岡は浸透破壊を判断する力学指標として式(5)に示す堤防脆弱性指標 t^* を与えている。

$$t^* = \frac{8}{3} \frac{Hkt'}{\lambda b^2} \quad (5)$$

ここに、 H ：河川水位、 k ：堤体透水係数、 t' ：洪水継続時間、 λ ：空隙率、 b ：表法河川水位の水際から裏法先までの水平距離である。

図-16は、浸透破壊した河川堤防の事例について解析結果と現地データの結果の比較を示す。破壊形態毎に t^* を見ると、ばらつきはあるものの、概ね次の範囲にプロットされている。

堤防決壊（赤）： $t^*=0.1\sim1.0$

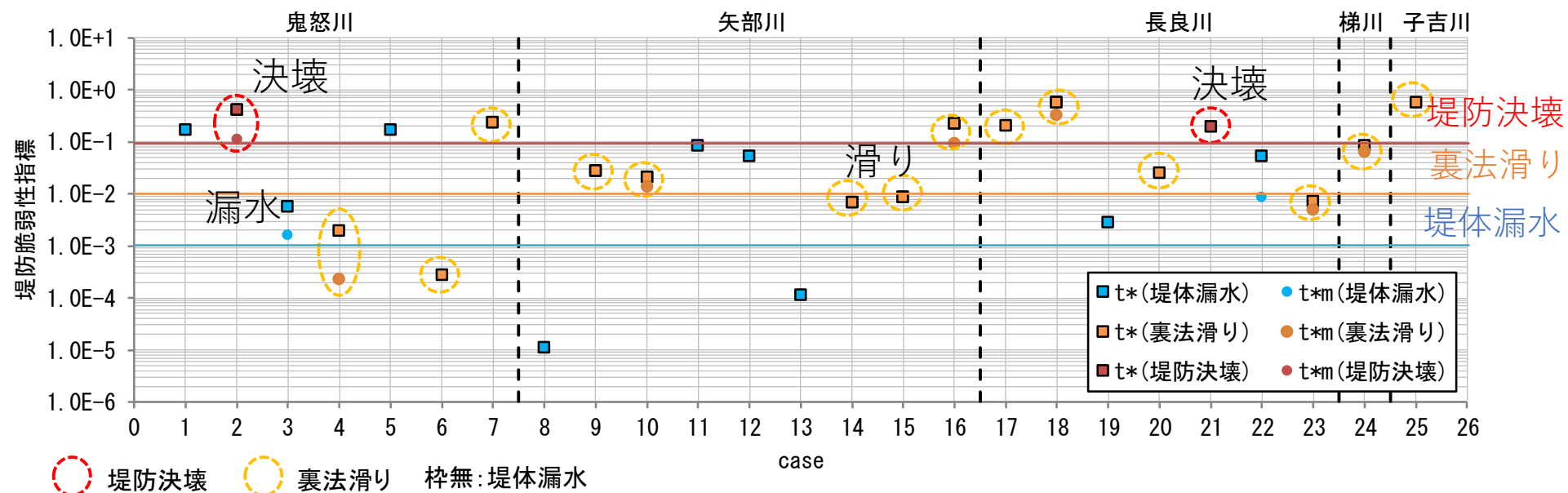
裏法滑り（黄）： $t^*=0.01\sim0.1$

堤体漏水（青）： $t^*=0.001\sim0.01$

五十嵐川の堤防脆弱性指標は0.003～0.005の範囲にあり、現地で破堤の前に漏水が見られたとの記述が委員会報告で見られるが、解析結果の漏水範囲に入っている。

現地及び模型の堤防脆弱性指標の検討

現地堤防



t^m (基盤への浸透を考えた場合)は、 t^* (不透水性基盤とした場合)よりも小さくなる傾向が確認できる。ただし、相対的な大小関係は変わらないことから、堤防の破壊危険性は t^* で評価できると判断できる。

破壊形態毎に t^* を見ると、ばらつきはあるものの、概ね次の範囲にプロットされていると見ることが出来る。

堤防決壊 (赤) : $t^*=0.1\sim1.0$

裏法滑り (黄) : $t^*=0.01\sim0.1$

堤体漏水 (青) : $t^*=0.001\sim0.01$

7. 河川管理施設構造令の見直しの必要性－人命を守る河川事業

河川管理施設等構造令²⁰⁾(以下では構造令と呼ぶ)には、堤防の高さ、天端幅、堤防法勾配については規定があり、正常な流水の流れの状態にあるときには、計画高水位（以下ではHWLと呼ぶ）以下の水位までは洪水は安全に流れることが示されている。一方、河道については河川整備基本方針でHWLまでは洪水を安全に流す川幅を決めている。

構造令は、河道を完成形に持っていく上での基本となる法令である。構造令には、堤防構造や河道のHWLについては記述されているが、河道の構造について具体的な規定を読むことはできず、またHWL以上で流れる洪水流、いわゆる超過洪水流を流す河道については明示されていない。

構造令では、計画断面が完成した河道では、計画高水流量が流れたときにHWL以下になって流れ、河道の安全は確保されるものとしている。整備途上河川にあっても、HWLまでの安全性が保たれることを目指して改修が行われており、治水施設の整備水準を超える河川の改修計画、維持管理に必要な河道計画については、国土交通省河川砂防技術基準¹⁹⁾に記載されている。

堤防にはHWLの上に余裕高が設定されており、HWLを超える洪水が発生すると河道を流下することもあり、破堤することもある。しかし、現行の構造令ではHWLを超える超過洪水に対する規定はない。このことは、河川整備基本方針の改定により計画高水流量の見直しを行うことが結果的にHWL以下の水位で流下するよう「計画高水流量を流下させる河道断面を確保する」か「河道以外で洪水流量を貯める」かいずれかの手段しかないように読み取れる規定となっている。

堤防と河道が河川施設として一体的に超過洪水を流すように構造令の見直しが必要である。大洪水時には、高いエネルギーの洪水流が河道を流下する。この大きな洪水エネルギーは、激しい土砂移動を伴い河道の洗掘と堆積をもたらす、時には堤防からの越流が生じる。これらは、堤防破壊につながる大きな原因になる。堤防と河道は超過洪水流量を含め洪水流を安全に流下させる役割を有している。このために技術、制度、法律等を積極的に新しいものに変えていく姿勢が求められている。

構造令の見直しに当たっては以下の考え方が重要になる。現状の河道は整備途上にあり、完成河道が出来上がるには大変な時間を要する。この間、河道に超過洪水が流れると堤防欠壊や破堤氾濫が起こり、人命が失われる危険性が高くなる。洪水災害から人命を守ることは河川管理の要諦であり、最優先されなければならない。このため整備段階においても超過洪水流が河道から溢れ出ないための堤防と河道の計画・設計が重要である。

長期的には計画高水流量に対し強靱性を強め、安全な河道を目指すとともに、短・中期的には柔軟性を持って氾濫から命を守る取り組みを進める必要がある。すなわち、堤防と河道改修による過渡的安全性や防災減災機能を十分に発揮させることも考慮した河川事業の進め方が肝要であり、完成河道を目指す中で、その途上にある整備途上段階の超過洪水流と堤防の関係も考慮しながら河川改修事業を行うことになる。

8. 超過洪水流に対する堤防と河道の一体設計―堤防余裕高部分の強化による活用

HWLの決め方は長い歴史を持つ河川管理の体系や土地利用等との折り合いの中で出来上って来たもので、これを変更することは容易ではなく現在のHWLありきで考えることには問題がないと考える。HWL以下の水位で流れる洪水流に対しては、堤防は、構造令及び河川砂防技術基準に基づく計画・設計法等で構造が規定されており、技術としてほぼ確立している。しかし、HWLから堤防の天端までは、構造上の堤防余裕高が設定されているものの、波浪、うねり、跳水等の局所的・一時的な水理現象や水防活動に対する構造的な余裕であり、超過洪水流の発生に対しては被災を受ける危険性が高い。現在の堤防余裕高部分について、超過洪水時の実際上の応答を十分検討し、これを超過洪水に活用できる手段を検討し、治水の安全度を高めることの意味は大きい。

5. 6. で見てきたように多摩川や五十嵐川は整備途上の河川であり、発生した超過洪水流では、水位がHWLを超えるだけでなく全エネルギー水頭は堤防高さを超え、著しい場合は洪水水位が堤防高さを超えた。この時、水面下では大きな洪水エネルギーの作用によって河床面での土砂移動も激しく河床は大きく変動し、洪水流のエネルギーの集中が大きい箇所では、高水敷、堤防等が被災を受けており危険な状況が生じていた。上記のことは、HWLを超える超過洪水流の堤防への作用は、水位や流速よりも全エネルギー水頭の三次元的な分布を用いた検討が望ましいことを示した。

平成16年、平成23年の五十嵐川洪水²⁵⁾は、全エネルギー水頭は現在の堤防天端より最大で1.0m程度高く成り、これは五十嵐川の堤防余裕高に匹敵する高さであった。多摩川では5.で対象とした堤防区間では、全エネルギー水頭は堤防天端より0.5m程度高かったが、現在の余裕高の範囲内にあった。この洪水は、両河川とも水位は堤防天端に近く、エネルギー水頭は天端より十分高いところにあり、堤防表のり面や高水敷の侵食が起こったが、**流下させることが出来た。現在の余裕高は、構造的な余裕の高さで超過洪水に耐え得るほど確かな耐力があるわけではない。堤防の余裕高部分を質的に強化すれば超過洪水に対して現在よりも治水安全度は高くなり、危機管理的に有効である。**構造令の見直しによる河道と堤防の一体設計を可能にすることにより、低水路線形や河道断面の改修が可能になれば、超過洪水に対する安全度はさらに高くなる。

本文は、整備途上河川において、超過洪水流の強大なエネルギーにどのように対応するかが中心課題であったために、堤防の高さや侵食を中心に論じた。**堤防の浸透破壊も重要な課題であることから、堤防脆弱性指標を用いた検討など堤防の安全性について総合的に検討が必要である。**

超過洪水時の安全な堤防と河道の設計には、土砂の移動に伴う砂州の動きを正しく捉えた河道の全エネルギー分布の算定が重要であることを示した。これまで洪水流に対して高精度な準三次元解析モデル^{5),6),23)}がつくられているが、**河床の土砂の動きを高精度で解析できる三次元洪水流・河床変動モデルの開発が喫緊の課題である。**

9. まとめ

本文では、気候変動という新たな条件下で時代の要請に応える河川技術これまでとこれからについて論じ、流域治水の方向性を示した。

1. 流域治水の技術の基本となる流域水収支解析についてその考え方と活用の仕方を示した。降雨分布から流域水収支図を得て、流域の洪水流解析を可能とするもので、これより、河川流域の技術的検討に必要な精度の高い水理情報を得ることが可能になるとともに、流域治水の対策の検討を可能にしている。
2. 超過洪水流の三次元エネルギー水頭の解析結果を堤防前面の高水敷や堤防表のり面の損傷、破壊に係づけることで、どこが堤防破壊の危険箇所になる可能性が高いかについてこれまでよりも信頼度の高い推定を可能にした。
3. 治水計画において超過洪水流に対する河道の安全性の考え方が十分整理できていないことに言及し、堤防と河道の一体設計について河川管理施設等構造令の見直しの必要性を論じた。五十嵐川、多摩川の超過洪水観測データと洪水流のエネルギーに関する水理検討を通して、全エネルギー水頭から超過洪水流の堤防高さを検討する方法を提示した。そして現在の堤防余裕高を強化することが、危機管理的に有効な対応策になることを示した。