

時代の要請に応える河川技術の これまでとこれから

THE PAST AND FUTURE OF JAPANESE RIVER TECHNOLOGY RESPONDING TO THE DEMANDS OF THE TIMES

福岡 捷二¹
Shoji FUKUOKA

¹フェロー Ph.D. 工博 機構教授 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1丁目13-27)

気候変動による想定を大きく超える自然外力は、社会、経済に大きな変化をもたらし、これまでの自然、社会、経済条件下での河川改修の進め方やスピードでは、洪水災害への対応が遅れ、災害の増大を引き起こす恐れが非常に大きい。流域治水への転換を図り、国土強靱化が叫ばれている今こそ、今後の流域・河川のあり方やその技術について十分考え変革し、社会の要請にこたえる絶好のタイミングである。

本文では、我が国で行われてきた河川改修や、河川技術の蓄積がこれまでの川づくりにどのように活かされて来たか、河川改修を加速し治水の安全性の確保や治水と環境の調和の実現に向けて流域治水をどのように進めて行くべきか、特に、超過洪水に対する河道計画をどのように実行するかは流域治水の成否に関わる大きな課題である。それには河川管理施設等構造令の見直しや、河川の土砂水理学の再構築等が必要である。半世紀を超える著者の河川技術研究、河川及び河川技術者等との対話を通して、これからの河川技術・研究はどうあって欲しいかについて論じている。

Key Words: *comprehensive flood control, river technology, water balance map, levee and channel design, essence of sediment transport*

1. はじめに

治水、利水、環境は河川の3機能であり、中でも、洪水を安全に流し、氾濫が起こっても被害の程度が大きくならない河川の治水は、流域の人間活動、産業活動が巨大化するほど必須の要件である。

気候変動は、世界、日本の社会・経済の動きを大きく変化させ、私たちの生活に大きく影響を与えている。また気候変動にともなっておこる想定を大きく超える自然外力の発生は、河川流域及び河川に及ぼす影響を著しく増大させている。この自然、社会、経済の大きな変化の中では、長い間考えられてきた自然、社会、経済条件下での河川改修の進め方やスピードでは対応が容易ではなく、河川のあり方、技術について革新が必要なことが明らかになった。河川に関係する研究者、技術者はこの状況をしっかりと受け止め、変化にどのように対応すべきかを考え実行しなければならない。

著者は50余年にわたり河川の技術と教育、研究に関わり河川技術と河川研究の変遷をみてきた。一方において、この20年間の河川を取り巻く環境変化に行政、研究は対応できていず、現在河川の抱えている課題を今後どう解決を図っていくべきかについて、著者の反省と期待を込

めて、次に続く世代の河川関係者に提言し議論して頂くことにした。

本文ではこれまでの河川技術がどのような背景で蓄積され活用されて来たのか、そして上述した経済、社会、自然環境変化の背景の中でこれからの流域治水における水収支分布を用いた流域・河川のあるべき姿、超過洪水に対応する堤防と河道の一体設計の基本的考え方、土砂問題解決に向けての調査・研究、河川流域の水収支と土砂収支、治水と環境の調和のあり方等について、河川技術者、研究者の参考にしていただければと願い主に著者が行ってきた研究を中心に纏めている。

2. 流域治水技術の革新的な推進と流域治水

マネジメント

(1) 水文学と河川工学をつなぐ流域水収支図の作成と流域治水への活用

我が国の河川の多くは改修途上にあることから、洪水外力の増大に対して河道の流下能力が小さく、氾濫被害が生じやすい。そのため、河道での洪水対策と流域での

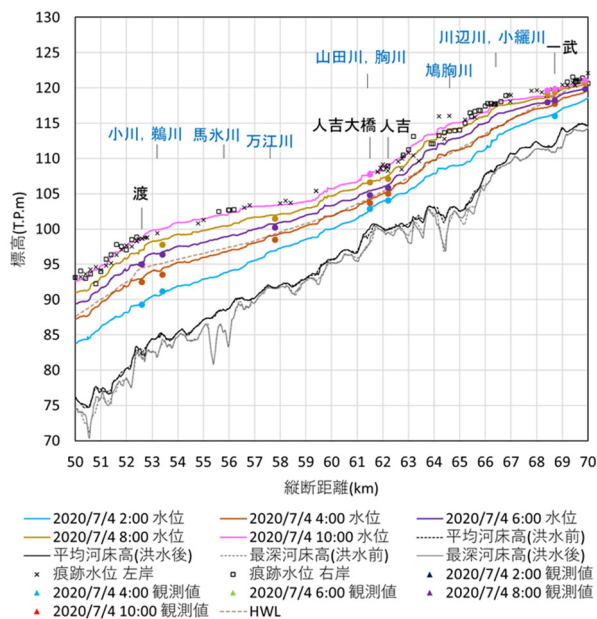


図-1 球磨川洪水水面形の時間変化の解析値と観測値の比較

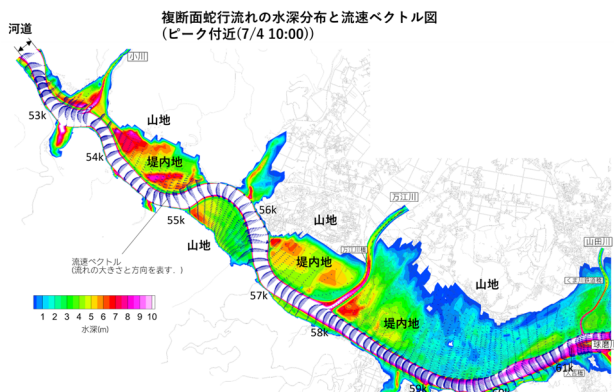


図-2 準三次元洪水解析モデルによる球磨川(渡～人吉付近)の洪水・氾濫

雨水の貯留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により本・支川の洪水流の発達、形成といった降雨流出過程を流域での水収支¹⁾の考えを用いて推算し、それを流域治水の基本的考え方、技術に据え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^{2,3)}と中・下流域における河川分野における洪水流の流下過程^{4)~6)}の調査研究成果をつなげ、統合化することが必要であり、これを流域水収支解析で実行する。

最初に流域水収支を考える。任意地点 x での流量を $Q(x)$ 、 Δx 下流側での流量を $Q(x+\Delta x)$ とする解析区間内の河道貯留量 S_{river} が求まる。

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

このようにして得た解析区間内の河道貯留量 S_{river} と、流域内の総降雨量やダム貯留量 S_{dam} 、解析結果から得

た流域から出ていく流量 Q_{out} を用い、流域水収支の基本式である式(2)を基に流域水収支分布図を作成する。

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

ここで、 S_{basin} をダム・解析区間内の河道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)である。

流域治水のkeyとなる技術は、流域における降雨量分布に対する貯留量と流出量の評価方法である。これには、洪水流の観測水面形から任意地点の流量ハイドログラフを求め、河道貯留量を見積もる方法が確立していたことが流域水収支解析を進める上で重要であった^{7)~10)}。洪水流の形成・伝搬機構が河道での洪水流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である洪水水面形の時間変化は、洪水流の貯留、排出過程を見える化している。このようにして得られた水面形の時間変化を洪水流解析の与条件とする高精度な洪水流解析法を開発し、洪水流の理解を大きく前進させ、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)}。

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準三次元洪水流解析の検討結果を示す¹⁴⁾。図-1は洪水流の水面形の時間変化についての解析結果と実測結果の比較である。洪水が河道内を流下している時間帯から氾濫時の時間帯まで水面形解析結果は実測の水面形の時間変化をよく説明している。渡地点の水位上昇スピードがその直下流の狭窄部の存在により著しく大きくなっていること、その水位上昇が人吉盆地の水位上昇に影響を及ぼしていることが分かる。図-2は渡～人吉付近の洪水氾濫ピーク時付近(7月4日10時)の河道の流速ベクトルと氾濫水深の解析結果を示す。溪谷の間に広がる盆地やその周辺において、河川の整備水準を超えて氾濫する洪水流の危険性がよく分かる。

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、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は、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)}。

現在、石狩川の支川豊平川、斐伊川、太田川流域等で流域水収支解析が行われ、流域の降雨分布から各流域や氾濫域、その総合としての全流域での水収支分布状況を提示し、これを流域関係者が共有することにより流域全体の治水安全度を上げるにはどのような対策が望ましいかを検討している。

一例として石狩川の支川豊平川の流域における流域水収支解析方法と結果を示す^{16)~18)}。図-3は、3つのStepからなる流域水収支図の解析方法を説明している。降雨分布が高い精度で観測されていることから、流域面積を最大でも5km²まで小さくしたこと、砂防河川まで水位計を設置したことにより分布型タンクモデルで精度を上げた

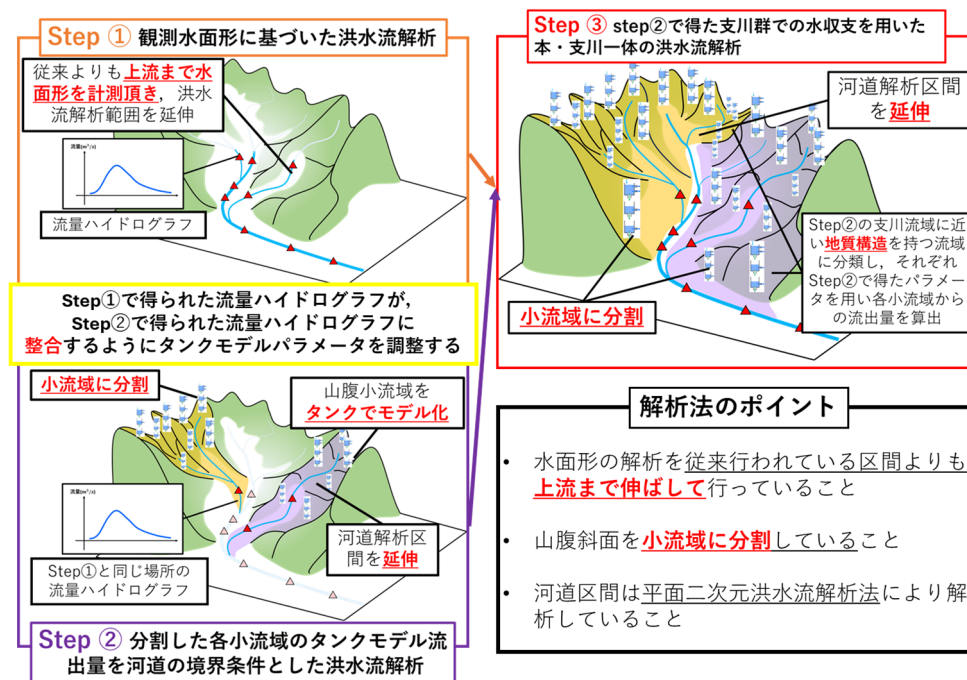


図-3 流域水収支解析法(Step①～Step③)

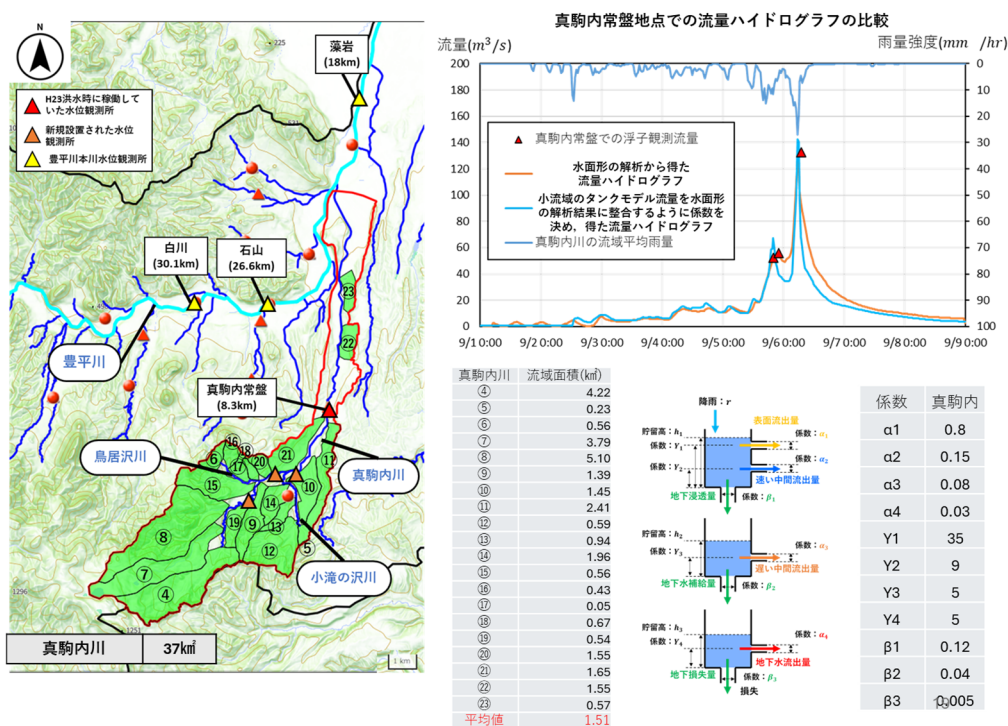


図-4 真駒内川でのタンクモデル流出量を用いた解析(Step②)

降雨の貯留・流出解析が可能になり、支川群での貯留・流出の形態を求め、流域河川群の流出特性を降雨分布、流域地形、地盤構造等との関係で推定可能としている(図-4)。降雨を与条件としてタンクモデルと河道の水面形の時間変化から図-5に示す流域のどこに、いつ、どの程度の水量がどのような状態で存在しているのかを示す水収支分布が求まる(Step②)。これを用いることで、流域の降雨分布のみから図-6に示す流域内の河川の任意

点での洪水位・流量等のハイドログラフを解析することが可能となる(Step③)。これにより、計画降雨を含む種々の豪雨に対する河川流域の洪水流の解析と治水計画の検討が可能になった。

流域水収支図は、流域に流出抑制対策としての貯留施設を考える場合に、その有無で検討した2つの流域水収支図の時空間分布を比較することにより、流出抑制対策の効果进行分析することができる。現在の治水計画では、

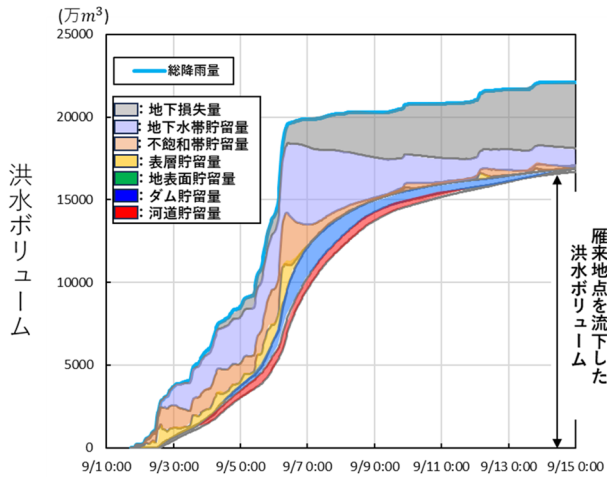
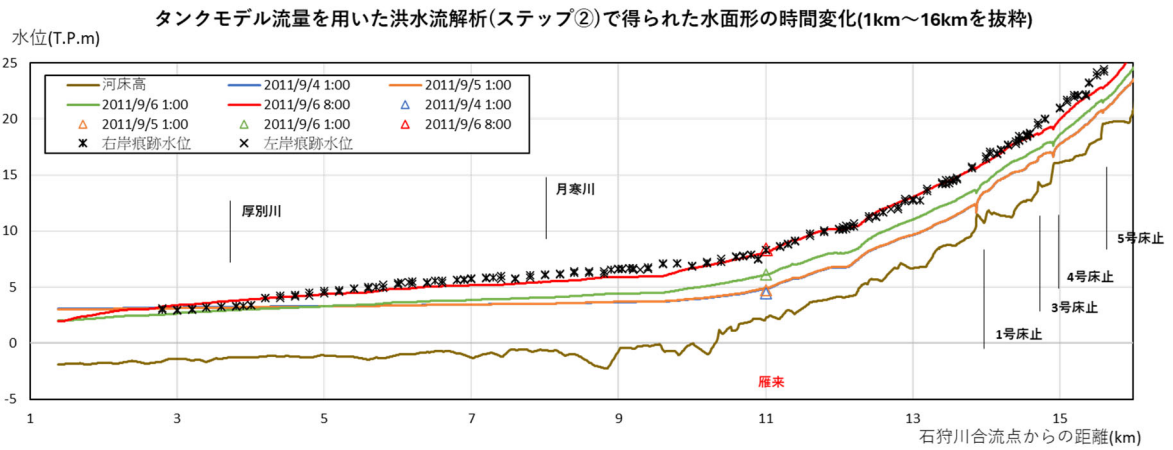


図-5 雁来地点(8.7km)より上流での豊平川流域水収支分布図

河道のある地点を流下する流量ハイドログラフが計画の判断に用いられており、これは本川の河道改修が中心で流域全体の水の動態からの判断が見えづらかった。これに対し、流域水収支図では、広い時空間での洪水ボリュームの収支を見える化することによって、水の動きを広い視点で捉え、種々の流域スケールでの治水マネジメントの検討が行える特徴がある。

流域水収支解析から得られることは、流域に降った豪雨を与条件として流域全体、各支川流域、氾濫流域等の多重スケールでの水収支分布を求め、洪水解析が行なえること、流域における貯留対策や氾濫対策を検討する際に流域スケールで見た分かり易い情報を関係者に提供し議論が出来ることにある。流域治水における水収支解析手法は一般的で汎用性が高い。流域水収支分布図の作成に用いる手法は、その流域の状況、治水目的、検討に必要なデータの準備状況等に応じて選べばよい。各Stepで用いられる解析技術、例えばStep2の流域貯留と流出過程の検討に用いた分布型タンクモデルは一つの手法であり、地域特性や目的に応じて他の手法を用いることは可能である。河道の洪水解析の方法には、非定常の一次元解析、二次元解析、準三次元解析法があり、降雨の貯留、流出解析には、タンクモデル、貯留関数法、RRIモデル等がある。

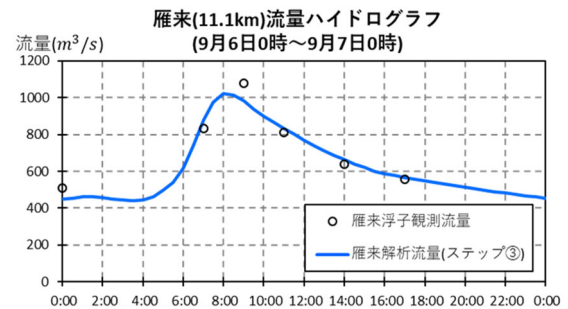


図-6 豊平川雁来での流量観測値と解析値の比較

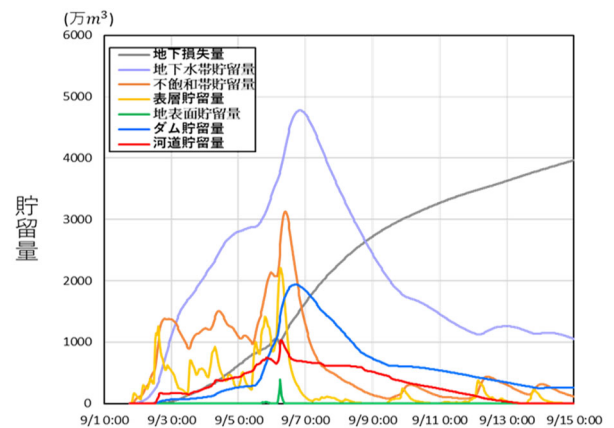


図-7 雁来地点(8.7km)より上流流域での貯留量の時間変化

本文で述べた豊平川流域で得られた流域水収支図からは、図-5から図-8までの結果を得ている。図-6は、流域の降雨分布が分かれば、任意地点の水位ハイドログラフ、流量ハイドログラフが見積もることが出来ることを示しており、これは大きな研究成果である。図-7は豊平川上流の豊平峡ダム・定山溪ダムへの流入ボリュームに対し放流ボリュームを抑制することで下流の豊平川基準地点雁木での洪水ピーク総ボリュームを減少させていることを示しており、ダム貯留量が洪水ピーク時に増加し、またその貯留量が流域の表層での貯留量とほぼ同等であることなど流域の貯留機能がよく分かる。また、図-8においては、雁来地点では洪水ピーク時までには本川を流下した総量がダムにより抑制された結果、紫で示す豊平川右岸中流域及び灰色の残留域流での洪水ボリュームが多く

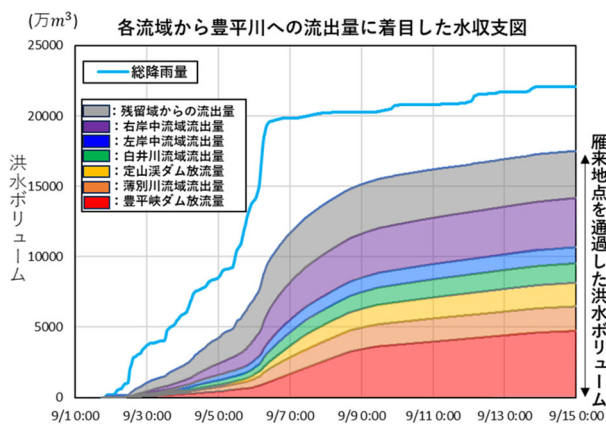


図-8 豊平川流域図と豊平川流域水収支図を用いた総流出量に対する各流域から雁来地点を通過する総流出量の関係

なっていること等、流域での豪雨に伴う水の挙動がわかりやすく示され、これまで行われてきた治水計画に、さらに詳細な情報を与えることになる。

減災を目的とする流域治水には、多くのことが求められており、これまでの技術に加えて新しい技術が不可欠である。流域水収支図はその典型例であり、その活用範囲は広い。新たな地平を開く同様な技術展開が技術者、研究者に期待される¹⁸⁾。

(2) 流域治水における効果的河川改修のために

a) 河道改修のキーとなる河道と堤防の一体設計技術確立のために

流域における洪水氾濫被害を少なくするために流域治水が進められつつある今日、河川管理者が考えなければならぬことは、河川をどのように改修し、管理していくかを分かりやすい形で提示し、さらに流域治水について将来の姿を流域関係者の理解を得ながら協働して作り上げていくことである。2. (1) で述べた流域水収支解析は有力な一つの方法であり、流域における降雨分布から

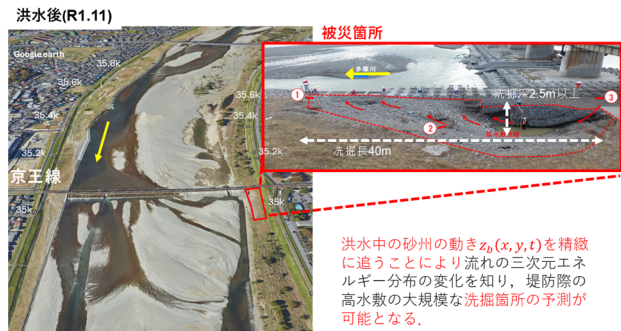


図-9 令和元年東日本台風における京王線多摩川橋梁の被災状況

流域の自然性を考慮し、流域での貯留量及び河道の洪水流を推算から流域治水の基本的な計画を提示することになる。

流域治水は、増大する洪水流量に対して河道を加速度的に改修し、河道の洪水災害リスクを低減させ、氾濫による浸水リスクを流域関係者と協働で低下させることである。そのため、河道の安全性を高め、洪水氾濫リスクを低くするために、第一は、洪水流が河道からあふれ出ないように河道と堤防の位置づけを明確化し、その役割実現に向けて考え方を整理する必要がある。河道を流れる洪水流については洪水観測体制の整備と解析技術の向上により、現在の技術は河道で何か起こっているかかなりの精度で推定可能なレベルに達している¹⁹⁾。河道から洪水が流れ出さないことが役割である河道と堤防は、河川の最も重要な治水施設である。

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、正常な洪水流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を安全に流す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。

本来、堤防は河道と一体的に大きなエネルギーを有して流下する洪水流を安全に流す重要な機能を果たすことが求められている。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、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、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。堤防と河道が洪水流を一体的に安全に流す河川施設の考え方をとりいれると、多様な考え方が可能となり得ることから、時代の諸要請に合わせた構造令の見直しが課題となる。

堤防は歴史的構造物であり、氾濫原に形成された自然堤防を活かして堤防の構築が行われて来た。その後、洪

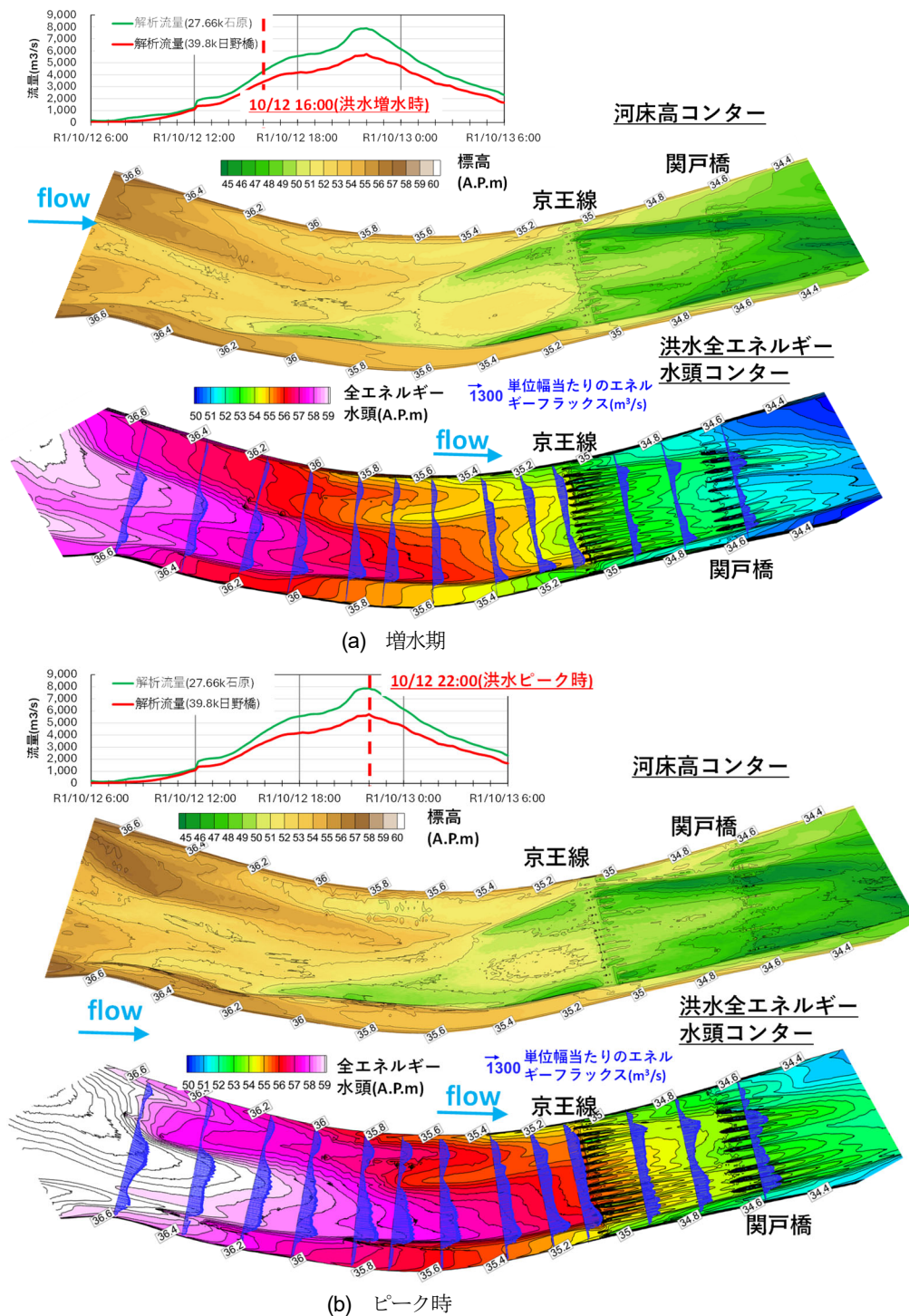


図-10 京王線周辺における洪水全エネルギー水頭とその輸送フラックス

水流量の増大による災害に対応して、堤防の拡築と河道の流下能力の増強が行われて来た。本来、河道計画として堤防の線形と河道の縦横断面形が一体的に検討されてこそ合理的な河道形状を作ることが可能であるが、1976年（昭和51年）の河川管理施設等構造令を作る以前の河川技術者は、河川沿いに発展した地域・まちづくりとの整合性を考え、まずは各河川のHWLを決め、それを満たすように河道断面を決めていくことにしたと思われる。

1960年代（昭和40年代）の構造令を検討していた時代

および制定当時1976年（昭和51年）は、HWLを決め堤防の設計基準を決めておくと思われていたと計画高水流量をHWL以下で流れる河道がやがて完成すると思っていたと思われる、当時の河川技術者の洪水氾濫防止に対する強い使命感と意志をここに感じることが出来る。

しかし、気候変動等に伴う流量増に対して河川改修のスピードが追いつけないこと等が明確になり、超過洪水に対する河道の安全性は、河道計画、特に堤防と河道の一体的な設計技術に密接に関係することからこのことを



(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-11 平成23年7月新潟・福島豪雨時の河道被害の様子

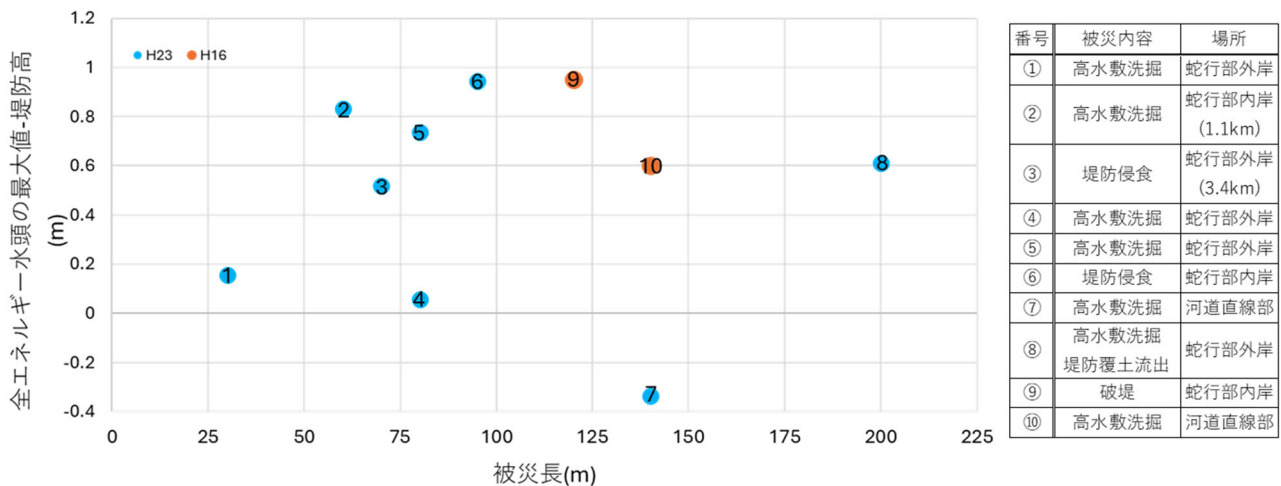


図-12 平成16年、23年の五十嵐川の洪水における（全エネルギー水頭最大値－堤防高）と高水敷洗掘被災長の関係状況

考慮した構造令の見直しが重要な技術課題となっている。

b) 洪水流のエネルギー分布の重要性とその評価法

近年、洪水流量の増大により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かなりの頻度で発生している。これは、改修途上にある河道の洪水流下能力不足が主要な要因であるが、加えて河道の平面形、縦横断面形の大きな変化と洪水水位の増大によってこれまで考えられて来なかった河道の流れの三次元水理現象が、が発生し、洪水流の抵抗増大となって危険な水位上昇をもたらしている¹⁴⁾²¹⁾。したがって、これまでの堤防と河道の設計の考え方を見直していくことが必要となる。

洪水時の水面を見ると、流れの流速は速くなっていることが分かる。流速が速いということは、その面上での流れは運動エネルギーを持っていることを示している。私たちが見ることが出来るのは水面であるが、水面上には運動エネルギーが加わった全エネルギー水頭面がある。河道は流下方向に大きな勾配を持っていることから、洪

水流は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)⁹⁾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が大きく関係することが分かる。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。これにより式(3)、(4)によれば、全エネルギー水頭の増加分には、砂州の移動等による河床の上昇分が極めて重要であることが分かる。

具体的に令和元年の多摩川における計画高水規模を超える洪水において、エネルギー水頭分布に及ぼす砂州の移動、変形の影響を調べてみた²³⁾。図-9では、低水路の砂州が大きさを変えながらの移動しており、その先の堤防際の高水敷河床が大きな洗掘を示していることが分かる。図-10(a),(b)は、それぞれ洪水増水中とピーク時の河床地形と全エネルギー水頭の三次元分布を示している。両図を比較すると流量の増大とともに砂州は成長移動し堤防に接近していること、その時洪水の全エネルギー水頭の三次元分布は堤防に向かう流れを起し、その結果、堤防際の高水敷上に洗掘が引き起こされたことを見ることが出来る。同様に、この洪水期間中に、多摩川の各所で、洪水エネルギーの集中によって、高水敷の洗掘や堤防等の構造物の被災が生じており、これはいずれも洪水流のエネルギーの集中とそれに伴う砂州の大掛かりな移動によって引き起こされたことが明らかになっている²⁴⁾。

後述するように、超過洪水にも対応する堤防と河道の設計は、全エネルギー水頭を用いた解析を用いて行う。そこでは洪水水中のエネルギーの集中による砂州の移動、変形の大きさの変化が高水敷や、堤防の損壊に大きく影響を与えていることから洪水水中の砂州の変形を高い精度で解析できることが重要となることに気づく。

c) 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、流れがHWLを越え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により水

流の集中による強い水衝部が現れ、時には堤防天端から越流することが起こる。また、河川横断構造物等の存在による構造物直上流の水位上昇、下流での水位低下に伴う河岸や河床の変動をもたらす。

このような水理現象は流水の通常的作用とは異なり、危険な外力が高水敷洗掘や、堤防損傷等を引き起こすことになる。近年越流に対する粘り強い堤防の調査研究や流域治水による新しい治水対策が検討されている。しかし、対策の効果を上げるためには、堤防からの越流がどのような原因によって起こるのか、堤防の越流危険性が高くなるのはどこか、越流による堤防の破壊形態はどのようなになるのか等、実際に起こる水理現象を高い精度で推定出来なければならない。

高水敷河床の侵食が起こっている場所で、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-11は平成23年新潟・福島豪雨における信濃川支川五十嵐川洪水における河道災害の状況を示す。図-12は平成16年、平成23年の五十嵐川の2つの洪水による洗掘を受けた区間の全エネルギー水頭分布を区間内で求め、それらの平均値の全エネルギー水頭と堤防天端の高さの差に対し高水敷河床の洗掘延長の関係を示している²⁵⁾。水衝部、蛇行部左岸、右岸や、橋梁位置によって、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。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、橋梁の影響によって異なることから、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箇所との関係を調べ、堤防の危険箇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。

3. 超過洪水流に対する堤防高さの水理的検討

(1) 河川管理施設等構造令と堤防

1965年（昭和40年）から施行された新河川法は、旧河川法（1933年（明治29年）に制定）を全面改正し新しい河川管理体系を構築してきた。河川管理施設等構造令は、ダム、堤防等、河川管理上必要とされる施設の一般的技術基準で、1981年（昭和51年）7月に制定された。その後、社会の変化や技術の進展に対応して数次にわたり一部改正が行われてきた。一方、1997年（平成9年）12月には、河川法の一部を改正し、「河川環境の整備と保全」を河川環境の目的として明示し、河川の安全を確保し、治水、利水、環境の調和を図りながら河川の適正、かつ総合的な管理が進められてきた²⁶⁾。しかし、私たちを取り巻く自然、社会、経済の急激な変化は、洪水災害の形で国民生活に影響を与え、河川行政は、流域治水への転換をせざるを得ない状況となった²⁷⁾。流域治水は、治水に関係する流域関係者が協働して流域の治水の安全性を高めることを狙いとしているが、第一義的には河道の改

修を強力に進めることが重要である。これを実行するには河道改修を進めるうえで現在課題となっていることを明らかにして、これを是正することが重要となる。

河川管理施設等構造令（以下では構造令と呼ぶ）は、河道を完成形に持っていく上での最も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。構造令では堤防はHWL以下の洪水流の通常的作用に対して、河川外に流出することを防止する安全な構造物でなければならないと規定されている。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になって流れ、河道の安全は確保されるものとしている。構造令では、HWL以下の洪水流に対して、国管理の河川堤防は流水の通常的作用の下では、計画高水流量が流れても河道の安全が保たれるように改修が行われ、HWLまでの安全性が保たれることを目指している。整備途上河川で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。

流域治水では、以下の理由から堤防と河道に関して構造令規定の検討が必要であると考えられる。豪雨外力の増大は、河道災害リスク、氾濫水害リスクを高め、流域治水への転換となった。流量が増大すると洪水流の水位と流速が増大し、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。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一体的な役割を有していることから流域治水の基本は、河道と堤防の技術の確立による安全性の確保であり、このために技術、制度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。

(2) 超過洪水流に対するHWL上の堤防高さの水利的決定法

計画河道が完成すると計画高水流量が河道をHWLで流れ、治水上の安全性は著しく高くなると考えられている。しかし、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とになる。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れ、人命が失われる危険性が高い。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、時間をかけて完成河道を一義的に目指すのではなく、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

方が肝要である。

本文では完成河道のHWLを超える超過洪水流と改修途上時の河道のHWLを超える超過洪水流の両方を包含する堤防高さの決め方を論じる。その理由は、完成河道の超過洪水流は、整備途上段階に発生する超過洪水流の堤防問題を含んでおり、完成河道の超過洪水流の問題解決を目指す中で、その途上で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完成河道を目指すことになる。

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いる。しかし、HWLを超える超過洪水に対しては、堤防の構造上の余裕高が設定されているものの、堤防は被災を受ける危険性が高い。

堤防は河道と一体的に機能して洪水流が堤内地に流れ出さないことを目的としている。超過洪水流に現れる水面のうねりや、跳水、流木の集積など水理的に算定が難しい現象や水防活動のために構造的な意味を持つ堤防の余裕高が設定されている。実際には余裕高は河道から水が溢れることに對し危機管理的な機能を果たしている。しかし、このような余裕高の考え方も包含して水理的に算定できる超過洪水流の持つ全エネルギー水頭との関係で堤防の高さを決めるのが望ましい。ここで「水理的」という意味は、HWLより上の堤防には、強さ、大きさが異なる超過洪水流が作用し、現在の技術では土で作られている堤防の耐力の視点から計画的な高さとして決めるほどの信頼度はない。しかし堤防設計論としては、堤防余裕高よりも水理学的根拠に基づいて算定される水理学的高さの方が、物理的な意味を持つ。

以下に超過洪水流に対する水理的な堤防高さの算定方法を述べる。超過洪水流は、非常に大きなエネルギーを持って流れており、超過洪水流には水位が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ることが起これ得る、著しい場合は洪水水位が堤防高さを超えることになる。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ている。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ことを洪水後の現地で見ることが出来る。これらの被災は、主に、低水路の蛇行線形や橋梁等の河川構造物が低水路河床での大きな砂州の変形・移動と影響を及ぼし合い、高いエネルギー水頭を有する流れの集中をもたらす、堤防に向かういわゆる強い水衝部を形成するためである。洪水流の侵食、高水敷河床の洗掘、堤防の表のり面の侵食へと進み、極端な場合には堤防破堤につながるものが現地の観測によって明らかにされて

いる。

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で検討することが望ましいことを示している。具体的には、堤防の天端高さは、以下の理由から河道の計画高水流量の全エネルギー水頭の高さを基準に考えるのがよいと思う。図-12に示す平成17年、平成23年の五十嵐川洪水²⁵⁾はいずれも計画高水規模の洪水であった。実際に発生した堤防や高水敷の被害箇所の区間で求められた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、これは堤防余裕高に匹敵する高さであった。この数値は、現在の堤防のHWL以上の余裕高部分を強化し、治水安全度を高めればよいことを示している。ここでは、水理的に決まる全エネルギー水頭に対する堤防高さの関係の考え方について検討しており、具体的には堤防強化の時に他の大河川についても検討することになる。

河道の流れは堤防で制御されており、その時の全エネルギー水頭は流量と河道縦横断面形で決まる。このことは、堤防と河道を一体として考えた2. (2)の全エネルギー水頭に基づく考え方が適用される。跳水や、風浪、うねり、流木の堆積、水防活動等に必要現在の構造的余裕高は、全エネルギー水頭から水理的に決まる高さの中に含めて考えるのが良い。

HWL以下の水位で流れる洪水流に対しては、現在の構造令の規定は問題がないことを先に述べた。しかし、現在行われているHWLを維持するための河道掘削は、土砂移動を考えると河床高の維持は容易でなく、また河道と堤防に与える洪水流の全エネルギー水頭の影響は著しく大きくなり、河道の維持管理を困難にすることになるので、この観点からの検討が必要である。

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。

4. 流域治水における治水と河川環境の調和

(1) 治水と河川環境の調和技術

1997年（平成9年）河川法の改正が行われ「河川環境の整備と保全」が加わってから約30年が経過しようとしている。改正河川法では、治水、利水、河川環境の整備と保全を総合的に捉えた河川管理を行うことを目的としているが、今なお個別に行われているものが多いように見える。

2017年（平成27年）6月16日、改正河川法20周年を迎え、国土交通省は河川環境行政について振り返り、今後の河川環境のあり方をまとめた。主要な点は、「日

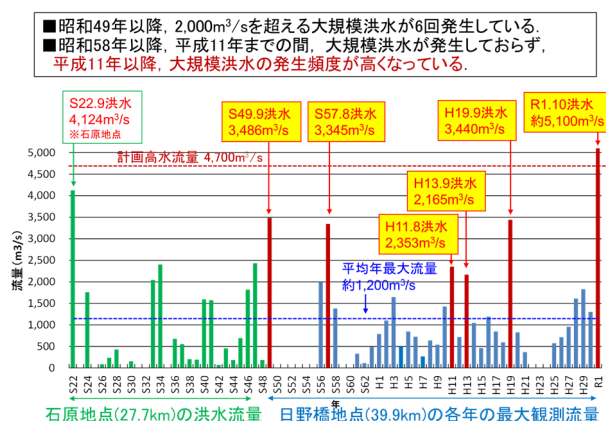


図-13 多摩川中流部における年最大洪水流量の履歴 (S22～R1)

常的な河川管理の中で、まずは自然の営力を活用した効率的な管理を第一に考え、これのみによることが出来ない場合には、様々な工夫を凝らした河川環境の整備と保全を徹底していくことが重要としている。加えて、将来に対する持続性を高めるために、地域社会との関わりを深め、さらには気候変動などの河川の環境を取り巻く将来的な変化も見据えつつ、日本の原風景である美しい川を引き継いでいくための川と人との持続的な関わりのあるあり方について検討を続けるべき」と提言している²⁷⁾。

治水や河川環境については、自然河川に学ぶことが大切であり、自然が作り上げた河道の構造、流水の状況は、河川技術者にとって何よりの教材であり、これを常に意識し、河川事業を進めることは大切である^{28),29)}。治水と環境を一体的、計画的に検討し、河川の計画・管理を行っている河川は現状ではそれほど多くないことから治水と環境の調和の検討すべき課題が多い。調和の実現には、堤防と河道が機能し、河道が大洪水時にも安定していることが必要である。加えて、対象河川における洪水流量と川幅、水深が「福岡の式」の関係を満たしていることが重要である。無次元河道形成流量と無次元河幅、水深の関係を示す「福岡の式」は、各洪水流量規模に必要な河道断面形、河幅を判断する目安を与えており、治水と環境の調和した川づくりに有効な情報を与える^{30)～32)}。例えば、図-13に示すように多摩川中流部では、73年間にわたる洪水データ、河川縦横断面形の経年変化データや河川改修工事の過程と河道の応答が調べられ、これより治水と河川環境の調和のあり方、今後の河川改修、維持管理のあり方に対し重要な知見が得られている。そこでは、二極化した複断面河道が動的に安定な河幅、断面形を有する船底形河道に改変される過程をエネルギー的考察から示し、治水上、環境上望ましい安定な河道断面形は船底形河道であることが観測データ、数値解析と現地船底形河道に基づいて示されて来た³³⁾。上記以外にも治水と環境の両面からの技術検討が実施されており、これらは自然に存在している石礫河道に特有の連続

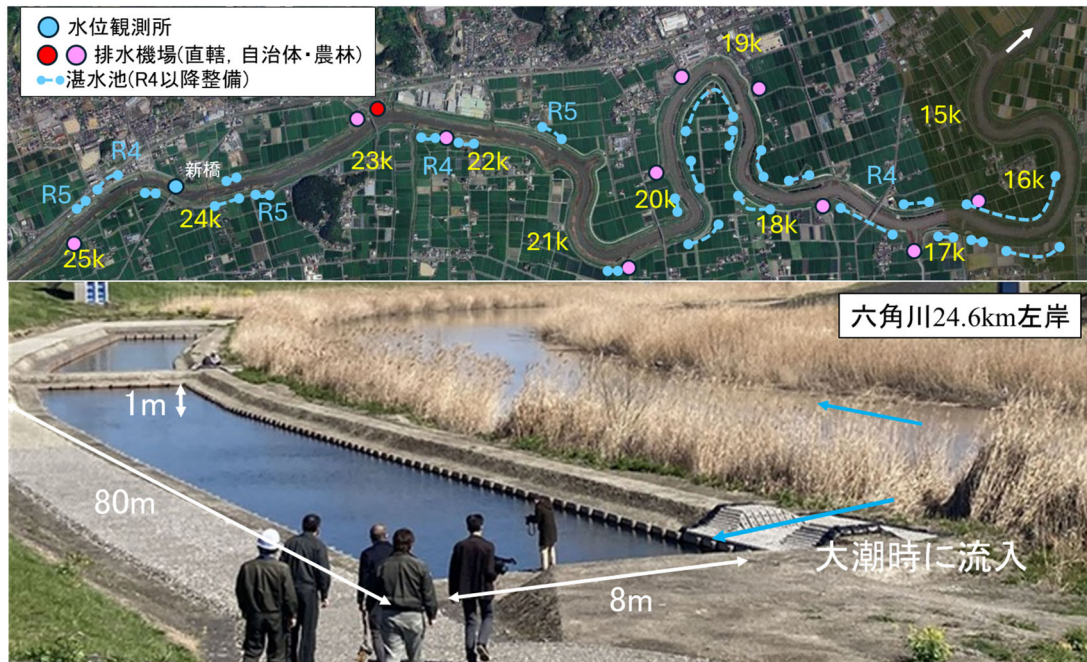


図-14 六角川高水敷に設置された湛水池

した礫段や河岸際の砂州等を模したものの等、自然から学んだ治水と環境の調和技術として活用されつつある^{34),35)}。

洪水はきわめて激しい現象であることから、水衝部には剛な工法を用い堤防、河岸の保護を行うことが多い。このような堅い施設は、水の集中を招きかえって水際の洗掘、堆積等悪い作用をもたらすことが多くの事例で分かっている。さらには、これらの対策によっては全エネルギー方程式(3)、(4)の河床高 z_b を大きくすることになり、結果的に堤防際の全エネルギー水頭を高めることになる。このことは水位の増大を招き、危険性が高まる。河道線形の改変による水衝作用の緩和など河道の水理や土砂移動の機構等の理解に基づいて柔軟な技術に代えるなど工夫が必要である。

河道の水理現象、生物の生息状況がかなりの程度明らかになり、解析技術が進展してきたことから、生物の生存、住処に相応しく、かつ治水上も問題を生じない自然の構造を模した人工的な仕掛け、構造を積極的に考えていくことが可能であり、そのような事例も増えて来ている。

以下に、著者らが、国交省と協働で行なってきた治水と環境の事業や治水と環境の調和を目的とした河川事業の実施例を示し参考に供したい。

1. 自然豊かな河道の川幅、断面形の作り方^{28~32)}
2. 土砂環境の変化と治水^{33~41)}
3. 治水と環境の調和を演出する河川堤防^{42~51)}
4. 治水と環境にふさわしい船底型河道の形成^{52~54)}
：遠賀川、江戸川、多摩川、阿賀川、太田川
5. 礫河原の再生と河床高の回復^{55~57)}：多摩川、浅川、阿賀川

6. 感潮域の干潟の地下水環境、生態系保全^{58~67)}：太田川放水路、荒川下流、多摩川、浅川
7. ヨシ原保全、再生と草本類護岸等による河岸保護^{68~80)}：荒川、多摩川、利根川、六角川、江の川
8. 樹木群管理^{81~92)}：利根川、石狩川、太田川、斐伊川、信濃川、多摩川、江戸川、阿賀川、雄物川、
9. 魚の保全水路^{93~95)}：黒部川、多摩川

これらは河川全体を考えて実施した事業と個別の事業が混在して列挙されているが、それぞれの内容については末尾の参考文献を参照していただきたい。

(2) 治水と環境の調和した流域治水の今後を考える

中小規模の洪水は、河川の水生生物の生活史にとって重要なかく乱作用をもたらすことが知られている。一方において、近年の超過洪水の発生頻度の増大は、大規模な河床の変動、河岸の侵食等をもたらす、水生生物の生息、生育、繁殖環境に影響を及ぼしそれらの生存を危うくすることが起こっている。

流域治水の展開の中で河川整備基本方針、河川整備計画の見直しが行われる今こそ、これまでの河川改修、管理の過程で行われてきた治水事業と環境整備事業の内容を調べ、それを活かしつつ治水と河川環境のあり方についても十分検討することが重要である。「環境の整備と保全」が河川法の目的に明示されて以降、約30年経過し、河川環境の定量化が論じられるようになってきた。

河川の生息環境には、河岸、河床形態、底質、栄養塩等が密接に関わっている。適切な生息環境の保持のためには、河川の土砂環境、水質の面からの考察が必要になる。砂利採取、河道拡幅や掘削などの河川改修、ダムや砂防施設の建設等の河川に対する人間の働きかけが、河

川の土砂移動、河道の状況を変化させて来た。このことが水中生物群集にとって好ましくない環境に変化させる⁶⁶場合もあり、土砂環境の面から望ましい改修のあり方が検討されなければならない。

上流から河道に適切な量と質の土砂が供給されていれば、河道断面形が大幅に変更されない限り、河道の土砂環境はそれほど大きく変化しないと考えられる。しかし、土砂が十分供給されず、低水路幅が大きく変更されると、河川形態や底質が改修前に比して著しく変化し、流路の固定化が進み、河道内に樹木等が生えやすくなる。その結果、流れと土砂環境の変化が生物の生息、生育、繁殖環境に影響を与えていると言われている。

これまでの河川の土砂移動機構のモデルを用いて生物の生息、生育、繁殖環境を論ずるには、現在の移動床の水理学では解析精度が低い場合が多い。このため河床付近の流れと土砂移動を適切に説明できる解析法が必要で、学術面から生物と土砂移動の関係について改善の努力が求められる。

2024 年（令和 6 年）2 月には、「生物の生息・生育・繁殖の場として相応しい河川整備及び流域全体としての生態系ネットワークのあり方検討会」の提言が取りまとめられ⁹⁶、河川においては「生物の生息・生育・繁殖の場」を河川環境の定量的目標として設定し具体的な取り組みを進めている。既往事例として、釧路川の自然再生、淀川河川整備計画におけるワンド、たまりの倍增、円山川の河川整備計画におけるコウノトリの生息に対する湿地面積の再生等がある。著者らも、九州地整武雄河川事務所と共同で六角川高水敷上に群生しているヨシ原に起因する水位の上昇が洪水氾濫の大きな原因となっていることから、図-14 に示すようにヨシ原の一部を連続した湛水池に代え、六角川の治水と環境の調和の実現に加えて河川環境の定量化を狙いとして調査研究を進めて来た。その結果、洪水水位の低下が見られること、湛水池が新たな生物の生息場、繁殖場として機能していること、湛水池にはヨシが生育しないことが明らかになり、ヨシ原群と湛水池からなる河道の治水と環境の調和した六角川が形成されつつあり、河川環境の定量化が可能な河川になっている⁹⁷。

多摩川における 73 年間の年最大洪水流量の発生状況とそれに対応する洪水流による被災や河川工事による河道の変化、植生変化過程データを用いた解析は、洪水流の規模、土砂移動量と植生の種類、繁茂位置・面積の関係を明らかにし、治水と河川環境の変遷、両者の関係について貴重な成果を示している³³。多摩川で行われた長期にわたる調査・解析は植生環境以外の生物環境の定量化が残されているものの、長期にわたるデータ収集と洪水流・河床変動解析は、「河川環境の定量化」に有力な情報を与えるものであり、他の河川においても有効な手法になると思われる。

5. 流域水収支と流域土砂収支を一体的に考え、土砂問題の解明促進を図る

豪雨時には流域から大量の土砂が流出し、河川管理に大きな影響を与えていることから、流域水収支と併せて流域土砂収支についても検討することが必要となる。流域の土砂の移動量は、水量のように連続的な流動ではないために、土砂移動量のデータ収集は困難を伴い、またその定量的解釈は容易でない。流域の土砂の挙動については、総合土砂管理の観点で計画論的な検討は行なわれているものの、観測データに基づく検証は不十分である。砂防分野、治山分野等で蓄積されてきた土砂観測技術とデータをベースに土砂移動の状況を捉えることがまず必要である。土砂の収支の検討は長時間を要することから全流域での観測にこだわらず、代表的な小流域での検討から始め土砂移動の実態理解から検討をスタートするのがよいと思う。

ドローンやレーザープロファイラー等新しい機動的な観測方法を用いた地形測量等から崩壊地の地形変化の経年的調査を行い、上流端での土砂生産量、累積流入土砂量を把握する。これは流域水収支図で言う豪雨の累積量に相当するものである。土砂生産量の把握は特に重要であり、生産域の状況、豪雨量、豪雨強度とその頻度等とどのような関係にあるか、どのような豪雨イベントや豪雨の累積時間で土砂の移動量が変化するか等を観測、理解する。検討区間の河道下流端から出ていく土砂の累積移動ボリュームを算定する。これには、ダム貯水池での堆砂量の経年変化の測定値が利用可能である。河道区間の土砂移動量は、洪水流・河床変動解析から把握することになるが、山地河川での河床変動解析の信頼度を高めることが必要である。これらの検討の中から外力である豪雨との関係で観測データを収集する適切な回数、時間、観測法、流域特性、豪雨の特性、累積土砂移動量等を理解し、流域土砂収支図を作ることになる。土砂収支図の作成に並行して同じ流域で水収支図を作り、水収支と土砂収支の相互の関係性を検討する。調査、解析を繰り返すことによって対象流域の土砂収支図の信頼度を上げていく。土砂収支図の精度を上げるためには、流砂量観測および、河床材料調査等現場での技術開発とともに山地河道に適した流砂量解析法、洪水流解析法の確立が必要である。

現在、土砂収支に関する国土交通省との共同研究で、黒部川宇奈月ダム流域、日野川菅沢ダム流域、豊平川豊平峡ダム流域等において、ダムの堆砂量を用いた流域土砂収支の研究会がつくられ、検討が進められている。

河川の土砂輸送は、洪水流の水理とともにほぼすべての河川問題に関わっており、前章までは、土砂輸送が関係する問題ごとにその重要性を繰り返し述べてきた。治

水面、河川環境面から河川の土砂輸送が引き起こす問題の広がり、深さを考えると、これまでの土砂移動の学術的、技術的検討方法では不十分なことは明らかである。本章では、河川の土砂輸送に関する問題の解明促進のため土砂移動に関する「これまでとこれから」について記述する。

我が国の河川の調査・研究は昭和20年代から始まったが、本格化は30年代からで、河川管理者である建設省（現在の国土交通省）は、洪水観測や洪水災害対策を通じて技術開発を行なって来た、この時代、建設省土木研究所では大掛かりな流砂実験が行われ、掃流流砂量式（土研式）⁹⁸⁾を作り日本の土砂輸送研究をリードしていた。一方、大学等では、基礎的な水理現象の理解を目的にした研究が主体で、実験水路で流砂に関する研究が行われていた。

昭和40年代半ばに入ると、建設省直轄技術研究会で、河川の水理現象、特に洪水流と河床変動について本格的な調査研究が進められるようになった。しかし、あくまでも河川の計画・管理のための技術が主体であり、今日の河川の水理現象の科学的理解には遠いものであった。昭和50年代以降は、大規模な河川災害が発生するたびごとに、災害原因調査団が構成され河川の洪水流と土砂移動に着目した調査・研究が増加した。これには、文部省科学研究費による自然災害調査研究班の果たした役割は大きい。この期間、大学等で行われた水解析や土砂移動に関する基礎的研究は進展を遂げ実験室での基礎的研究から、流砂量式等が生まれる等、実験室で導かれた成果が、現地の洪水流や河床変動の計算等に用いられるようになった。

平成年代以降は、数値シミュレーション技術が土砂移動の主たる研究手段となった。数値シミュレーション技術はこれまで対応できなかった土砂移動問題を広く扱うことを可能にしてきた⁹⁹⁾。しかし、そのモデルの要素技術は、昭和40年代、50年代の移動床実験水路での知見をベースに組み立てられており、力学的普遍性、一般性が弱い欠点を有している。多様な土砂移動現象の科学的に解明、改善すべき点が見出されてきたにもかかわらず、パラメータによる答え合わせの域を出ず、河川の土砂移動の機構解明は不十分な段階に留まっている。これは、土砂移動現象の工学的解釈が優先され、現象の説明ができれば良いとの判断に偏り、科学としての土砂水理学について十分議論されて来なかったためであると考え。

これからの土砂水理学は、その到達目標を現地で起こっている種々のスケールおよび多様な土砂移動を工学的、科学的に一般性をもって説明、記述できる技術、学術にしていけることが望まれる。流れによって輸送される土砂は、大きさや形の異なる粒子群からなり、河床付近で非平衡で、非定常な運動をする力学特性を有する。これらの特性を適切に取り込まないと、河川の土砂移動現象の解明は達成し得ない。

土砂粒子の運動は土砂移動の平均的な運動の記述を狙いとし工学的な役割の高いオイラー的方法と個々の粒子を追いかける力学的な一般性を有するラグランジュ的方法がある。後者については、混合砂礫の分級機構の解明、乱流中の浮遊者砂運動や、土石流の形成・発達の研究等成果を上げつつある。

それぞれの解析法には、メリット、デメリットがあるが、前者の工学的重要性は、河川で起こっている水理現象を解明する上で必要であり、これの科学性の不十分さは、後者の科学的な一般性の高い土砂移動機構の知見を取込むことによって、工学的、科学的に説明力のある土砂運動モデルが求められつつあり、今後の進展が期待される¹⁰⁰⁾。

6. おわりに

河川技術の「これまでとこれから」は非常に大きなテーマである。これを私が執筆しようと考えたのにはいくつかの理由がある。第1は、現在の河川技術に魅力を感じる若手技術者、若手研究者が少なく、これに加えて、河川に関心を持つ人の数が減じ、河川技術の低下、国民の関心低下、このことが国土の荒廃に繋がることを心配したこと、第2は「河川技術のこれまで」を理解しないで、「河川技術のこれから」を議論出来るのであろうか、不十分な内容であっても、読んでもらうことは重要であると考えていること、第3は、現役河川技術者、河川研究者に河川という社会資本の整備にもっとやる気を出し、次の世代に優れた社会資本を残してもらいたいこと、第4は、河川技術に関するこの大テーマを纏め、課題を明らかにし、私としても次の段階に進みたかったこと、である。

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流域治水の河川技術の課題を示し、解決の方向性を示した。

- 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は、堤防前面の高水敷や堤防表のり面の損傷、破壊に係ることで、どこが堤防破壊の危険箇所になるかこれまでよりも詳細に推定することが可能としている。
- 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。堤防と河道の一体的設計法に基づく超過洪水流に対する堤防高さについて、超過洪水

流の全エネルギー水頭から堤防の高さを水理的に決める方法を示した。

- 4) 治水と河川環境の調和は、「河川環境の定量化」を含めて今後の流域治水を構成する重要な技術としてこれまでの調査研究をまとめている。
- 5) 土砂輸送は河川のほぼすべてに関わる水理現象で河川管理の重要な支配要因である。現状の土砂輸送の技術は今なお不十分で、しっかりした基盤を作ることが学術に求められる。

参考文献

- 1) 福岡捷二：近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える，河川技術論文集，第28巻，pp.457-462，2022。
- 2) 小葉竹重機，石原安雄：タンクモデルおよび集中面積図を利用した洪水流出モデルの総合化，土木学会論文報告集，第337号，pp.129-135，1983。
- 3) 吉野文雄，吉谷純一，堀内輝亮：分布型流出モデルの開発と実流域への適用，土木技術資料，Vol.31-10，pp.54-59，1990。
- 4) 福岡捷二，渡邊明英，原俊彦，秋山正人：水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算，土木学会論文集，No.761/II-67，pp.45-56，2004。
- 5) 内田龍彦，福岡捷二：浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法，水工学論文集，第56巻，pp.1225-1230，2012。
- 6) 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)，Vol.75，No.1，pp.61-80，2019。
- 7) 福岡捷二：招待論文，洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術，河川技術論文集，第12巻，pp.1-6，2006。
- 8) 福岡捷二：河道設計のための基本は何かー水面形時系列観測値と洪水流ー土砂流の解析を組み合わせた河道水理システムとその見える化，河川技術論文集，第17巻，pp.83-88，2011。
- 9) 福岡捷二：洪水流の水位と流量の今日的考え方ー多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見る化すー，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.73，No.4，I_355-I_360，2017。
- 10) 福岡捷二：洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域治水の考え方の構築に向けて，河川技術論文集，第23巻，pp.251-256，2017。
- 11) 田端幸輔，福岡捷二，中平善伸：複雑な河道システムを有する信濃川下流域の治水機能の評価と今後の治水対策のあり方，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.70，No.4，I_1483-I_1488，2014。
- 12) 小淵康正，吉村綾子，宮川勇二，岡村誠司，天野光歩，福岡捷二：江戸川流頭部の河道計画の策定ー先導的な数値解析を中心とした新しい河道設計技術ー，河川技術論文集，第21巻，pp.153-158，2015。
- 13) 福岡捷二，田端幸輔，出口桂輔：平成27年9月洪水における鬼怒川下流区間の流下能力，河道貯留及び河道安定性の検討，河川技術論文集，第22巻，pp.373-378，2016。
- 14) 田端幸輔，後藤岳久，竹村吉晴，酒匂一樹，福岡捷二：令和2年7月球磨川豪雨における洪水流と氾濫流の一体解析による人吉市街地と峡谷区間の集落の被害分析，河川技術論文集，第27巻，pp.597-602，2021。
- 15) 見上哲章，水草浩一，西澤洋行，安達孝実，福岡捷二：利根川上流域の本・支川を一体とした洪水流解析ー流域治水への活用に向けて，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.77，No.2，I_427-I_432，2021。
- 16) 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。
- 17) 福岡捷二：基調講演，流域管理と地域計画の連携に向けてー流域水収支図と流域土砂収支図の作成と活用，第11回流域管理と地域計画の連携に関するワークショップ，2024。
- 18) 石井優太郎，福岡捷二：降雨流出と河道と洪水流の一体解析による流域水収支分布図の作成とその応用，土木学会論文集，2025，（登載決定）。
- 19) 国土交通省 河川砂防技術基準 調査編 国土交通省水管理・国土保全局，2014。
- 20) 財団法人，国土開発技術センター編：改定解説・河川管理施設等構造令，社団法人河川協会，山海堂，2000。
- 21) 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。
- 22) 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，pp.411-416，2024。
- 23) 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。
- 24) 国土交通省京浜河川事務所，第8回多摩川・浅川河道管理検討会，多摩川における河道検討会について，参考資料編2，2024。
- 25) 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。
- 26) 河川六法（平成13年版）：国土交通省河川局監修，大成出版社，2001。
- 27) 「河川法改正 20 年多自然川づくり推進委員会」
http://www.mlitt.go.jp/river/shinngikai_blog/tashizen/index.html。
- 28) 福岡捷二：巻頭言 これからの河川管理に望むことー自然河川に学ぶ，河川，No764，pp.3-7，2010。
- 29) 福岡捷二，木暮陽一，佐藤健二，大東道郎：自然堆積河岸の侵食過程，水工学論文集，第37巻，643-648，1993。

- 30) 浅野文典, 福岡捷二: 沖積地河川における安定な川幅・水深—治水と環境の調和を目指した河道断面形の決め方, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.1021-1026, 2010.
- 31) 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 (招待論文), 土木学会論文集 F, Vol.66, pp.471-489, 2010.
- 32) 福岡捷二: 札内川の河道変遷を考慮した治水と環境の調和した安定な河道縦・横断形状に関する研究, 一般財団法人北海道河川財団研究所紀要, XX1, pp.123-164, 2013.
- 33) 後藤勝洋, 寺西浩三郎, 後藤岳久, 福岡捷二: 多摩川中流部における河道の長期変遷(1947 年~2020 年)から見た低水路河道の安定・不安定と河川植生の相互関係の分析, 河川技術論文集, 第 28 巻, pp.217-222, 2022.
- 34) 澤原和哉, 須賀正志, 安部友則, 福岡捷二: 急流河川における巨石を用いた新たな河岸侵食対策の立案と検証, 河川技術論文集, 第 14 巻, pp.109-114, 2008.
- 35) 福留脩文, 有川崇, 西山稔, 福岡捷二: 石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計, 土木学会論文集 F, Vol.66, pp.490-503, 2010.
- 36) 福岡捷二: 河川災害を減じ豊かな水環境を創造する—大学の技術開発と社会資本整備—: オピニオン: Chuo Online: YOMIURI ONLINE (読売新聞) 2015.
- 37) 福岡捷二, 藤田光一, 新井田浩: 樹木群を有する河道の洪水水位予測, 土木学会論文集, No.447/II-19, pp.17-24, 1992.
- 38) 福岡捷二: 石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋, 水工学に関する夏季研修会講義集, A コース, pp.1-25, 2008.
- 39) 小澤太郎, 福島陽介, 海津義和, 後藤岳久, 福岡捷二: 多摩川上流部における治水と環境の調和した総合的な河道管理, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp.471-476, 2013.
- 40) 塚本洋祐, 江口武彦, 福岡捷二: 2011 年 12 号台風における旭川の河道変化と土砂収支に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, I_937-I_942, 2014.
- 41) 福岡捷二: 大規模洪水に適応する河道の設計・管理技術, 水工学に関する夏季研修会講義集, 第 50 回, A-7-1-A-7-20, 2014.
- 42) 田端幸輔, 福岡捷二, 瀬崎智之: 超過洪水時における堤防破堤確率評価手法に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.4, I_1273-I_1278, 2015.
- 43) 福岡捷二, 田端幸輔: 堤体基礎地盤の透水性・堤防強化対策を考慮した堤体内非定常浸潤線解析法の開発と堤防破壊危険確率の低減効果の見積りに関する研究, 河川技術論文集, 第 22 巻, pp.261-266, 2016.
- 44) 田端幸輔, 福岡捷二: 準二次元非定常浸透流解析に基づいたパイピングによる堤防破壊危険度の評価法, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, I_1327-I_1332, 2017.
- 45) 田端幸輔, 福岡捷二, 内堀寿美男, 上村勇太: 堤防脆弱性指標に基づいた堤防破壊危険性評価に関する研究—鬼怒川中下流部平成 27 年 9 月大洪水を例として—, 河川技術論文集, 第 23 巻, pp.387-392, 2017.
- 46) 上村勇太, 福岡捷二: 堤防脆弱性指標に基づく洪水位下降時における裏法安定性に関する研究, 河川技術論文集, 第 24 巻, pp.547-552, 2018.
- 47) 福岡捷二, 田端幸輔: 浸透流を支配する力学指標と堤防浸透破壊の力学的相似条件—浸透流ナンバー-SFn と堤防脆弱性指標 t^* , 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I_1435-I_1440, 2018.
- 48) 田端幸輔, 堀内崇志, 福岡捷二: 狭窄部と盆地部が連続する千曲川における大規模洪水時下の河道貯留・堤防浸透破壊危険性の評価と今後の治水整備のあり方, 河川技術論文集, 第 25 巻, pp.553-558, 2019.
- 49) 福岡捷二, 石塚宗司, 田端幸輔: 堤防脆弱性指標を用いた平成 28 年十勝川大洪水時における丘陵堤整備区間の浸透破壊に対する安全性と破堤リスク軽減に向けた今後の堤防設計の考え方, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No.2, pp.I_1399-I_1404, 2019.
- 50) 佐藤豊, 福岡捷二: 堤防基盤脆弱性指標 tb^* と地形, 土質構成に基づく堤防のり先での漏水形態の推定法, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77, No.2, pp.I_121-I_126, 2021.
- 51) 上村勇太, 福岡捷二, 田端幸輔: 水位の上昇・降下に伴い変化する河川堤防浸潤線の評価法に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_1255-I_1260, 2018.
- 52) 笹木拓真, 宮原幸嗣, 福岡捷二: 複断面から船底形河道への改修による洪水流況及び低水路河床高の変化, 河川技術論文集, 第 20 巻, pp.277-282, 2014.
- 53) 後藤岳久, 福岡捷二, 植田彰: 太田川放水路下流部に形成された船底形河道の河岸沿い干潟保全のための技術検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, I_1093-I_1098, 2014.
- 54) 後藤勝洋, 後藤岳久, 瀬尾敬介, 福岡捷二: 大規模洪水による高水敷化した砂州河岸の洗掘に伴う船底形断面形の形成, 河川技術論文集, 第 29 巻, pp.329-334, 2023.
- 55) 須賀正志, 前嶋達也, 藤本昌利, 長田健吾, 福岡捷二: 滞筋化・低下した石礫河川の河床高回復技術の開発研究, 河川技術論文集, 第 15 巻, pp.273-278, 2009.
- 56) 森僚多, 石川武彦, 長田健吾, 福岡捷二: 多摩川水系浅川における河床高回復現地実験と河道管理手法, 河川技術論文集, 第 16 巻, pp.113-118, 2010.
- 57) 遠山和広, 米沢拓繁, 福岡捷二: 多摩川水系浅川における河床高回復現地実験による効果の検証, 河川技術論文集, 第 22 巻, pp.205-210, 2016.
- 58) 日比野忠史, 保光義文, 福岡捷二, 水野雅光: 洪水に伴う河口干潟環境と生物生息の変化, 河川技術論文集, 第 12 巻, pp.431-436, 2006.
- 59) 日比野忠史, 松本英雄, 水野雅光, 福岡捷二, 保光義文: 河口干潟での棲息生物種を特定するための土壌および水質変動特性の把握, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp.589-594, 2006.
- 60) 中下慎也, 日比野忠史, 福岡捷二, 水野雅光: 複断面形状が形成する地下水流と河口干潟の特性, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.1246-1250, 2007.

- 61) 駒井克昭, 中下慎也, 日比野忠史, 福岡捷二, 水野雅光: 河川感潮域における河床面での水交換, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.1315-1320, 2008.
- 62) 日比野忠史, 駒井克昭, 福岡捷二, 水野雅光: 河口干潟地盤内水環境に及ぼす浸透河川水の影響, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.1309-1314, 2008.
- 63) 川西澄, 横山智弥, 水野雅光, 福岡捷二: 超音波ドップラー流速分布計による干潟上の浮遊堆積物の観測, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.949-954, 2008.
- 64) 中下慎也, 日比野忠史, 福岡捷二, 岡田光正, 水野雅光: 出水期における干潟地盤内での水質変動特性, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.1081-1086, 2008.
- 65) 後藤岳久, 福岡捷二, 宮川勇二: 太田川放水路の河岸沿い干潟の洪水流による形状変化, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp.159-164, 2013.
- 66) 後藤岳久, 福岡捷二, 植田彰: 太田川放水路下流部に形成された船底形河道の河岸沿い干潟保全のための技術検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, I_1093-I_1098, 2014.
- 67) 日比野忠史, 森本優希, 福岡捷二, 植田 彰: 河口域に堆積する有機物を含む細粒泥の特性把握に関する考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, I_1471-I_1476, 2015.
- 68) 福岡捷二, 甲村謙友, 渡辺明英, 三浦央晴: 船が造る波のエネルギーを減衰させる河岸ヨシ原の効果, 水工学論文集, 第 36 巻, pp.713-716, 1992.
- 69) 福岡捷二, 新井田浩, 佐藤健二: オギの河岸侵食抑制機構と耐力の評価, 水工学論文集, 第 36 巻, pp.81-86, 1992.
- 70) 福岡捷二, 渡辺和足, 柿沼孝治: 堤防芝の流水に対する侵食抵抗, 土木学会論文集, No.491/II-27, pp.31-40, 1994.
- 71) 福岡捷二, 渡辺明英, 上阪恒雄, 津森貴行: 低水路河岸に樹木群のある河道の洪水流の構造—利根川新川通昭和 56 年 8 月洪水—, 土木学会論文集, No.509/II-30, 79-88, 1995.
- 72) 北川明, 宇多高明, 福岡捷二, 竹本典道, 服部 敦: 植生によって被覆した越流堤耐侵食性に関する現地実験, 土木技術資料, 37 [6], pp.20-25, 1995.
- 73) 福岡捷二, 箕浦宏和, 岡本裕司: 荒川下流部におけるヨシ原再生の技術開発—大きな干満差と航走波の厳しい条件の中で, 河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, Vol.3, pp.251-258, 1997.
- 74) 福岡捷二, 渡辺明英, 盛谷明弘, 日比野忠史, 大村靖人: オギ原上を流れる洪水流に関する現地実験とオギ原の抵抗特性, 河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, Vol.3, pp.245-250, 1997.
- 75) 福岡捷二, 渡辺明英, 柏木幸則, 山縣聡: ヨシで覆われた河岸の洪水流による侵食と流路の変動過程, 河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, 第 4 巻, pp.83-88, 1998.
- 76) 田畑和寛, 大手俊治, 江上和也, 平田真二, 福岡捷二: 荒川下流域におけるヨシ原の形成と保全プロセス, 河川技術論文集, Vol.7, pp.273-278, 2001.
- 77) 福岡捷二, 仲本吉宏, 細川真也, 泊宏, 京才俊則: ヨシ原河岸をもつ河道における航走波のエネルギー分布特性, 河川技術論文集, Vol.7, pp.279-284, 2001.
- 78) 福岡捷二, 福田朝生, 永井慎也, 小谷哲也, 富田紀子: ヨシを用いた水際保護の研究, 水工学論文集, 第 47 巻, pp.997-1002, 2003.
- 79) 福岡捷二, 島谷幸宏, 田村浩敏, 泊耕一, 中山雅文, 高瀬智, 井内拓馬: 水流による高水敷上のヨシ原の倒伏・変形と粗度係数に関する現地実験, 河川技術論文集, 第 9 巻, pp.49-54, 2003.
- 80) 福岡捷二, 仲本吉宏, 福田朝生, 石上鉄雄: ヨシ原で覆われた河岸の崩落機構と護岸機能の評価, 土木学会論文集, No.761, II-67, 19-30, 2004.
- 81) 福岡捷二, 五十嵐崇博, 高橋宏尚: 江の川水防林の特性と治水効果, 水工学論文集, 第 39 巻, pp.501-506, 1995.
- 82) 福岡捷二, 渡邊明英, 大橋正嗣, 姫野至彦: 樹木群の水制的利用可能性の研究, 水工学論文集, 第 41 巻, pp.1129-1132, 1997.
- 83) 福岡捷二, 樺澤孝人, 斎藤潤一, 布施泰治, 渡邊明英, 大橋正嗣: 柳水制の試験施工とその機能の現地調査, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.445-450, 1998.
- 84) 福岡捷二, 川岡秀和, 平林由希子: 水害防備林と低水路線形が洪水流に与える影響, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.967-972, 1998.
- 85) 渡邊明英, 福岡捷二, 安竹悠, 川口広司: 河道湾曲部における河床変動を抑制する樹木群水制の配置方法, 河川技術論文集, Vol.7, pp.285-290, 2001.
- 86) 福岡捷二, 佐藤宏明, 藤澤寛, 大沼史佳: 洪水流と河道の樹木繁茂形態に基づく樹木群透過係数と粗度係数の算定法, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.607-612, 2007.
- 87) 田中規夫, 八木澤順治, 佐々木寧, 福岡捷二: 河道内樹木の洪水破壊形態と破壊限界値の基盤土壌条件による相違, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.649-654, 2008.
- 88) 八木澤順治, 田中規夫, 福岡捷二: 砂礫州上に繁茂する植生の洪水流出限界評価, 河川技術論文集, 第 14 巻, pp.139-144, 2008.
- 89) 大沼史佳, 須藤純一, 福岡捷二: 治水と環境を考えた河道内樹木管理の一つの試み, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.613-618, 2009.
- 90) 後藤岳久, 福岡捷二: 太田川洪水流による砂州の洗掘と樹木倒伏機構に関する研究, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.787-792, 2009.
- 91) 田中規夫, 八木澤順治, 福岡捷二: 砂礫州上における繁茂場所の相違が樹木の洪水時流失限界に及ぼす影響, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.631-636, 2009.
- 92) 八木澤順治, 田中規夫, 福岡捷二: 河道内植生の洪水流による破壊および破壊規模に応じた再生・拡大過程を考慮した

- 植生モデルの開発, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp.393-398, 2013.
- 93) 福留脩文, 藤田真二, 福岡捷二: 淵環境を回復した低水路水制の設計とその環境機能の評価, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.1267-1272, 2010.
- 94) 長田健吾, 福岡捷二, 氏家清彦: 急流河川における砂州を活かした治水と環境の調和した河道計画, 河川技術論文集, 第 18 巻, pp.227-232, 2012.
- 95) 後藤勝洋, 瀬尾敬介, 後藤岳久, 福岡捷二: 多摩川中流部における船底形河道の形成と植生生育場・魚類避難場に関する研究, 土木学会論文集, Vol.80, No.16, pp.23-16059, 2023.
- 96) 生物の生息・生育・繁殖の場としてもふさわしい河川整備及び流域全体としての生態系ネットワークのあり方: 生物の生息・生育・繁殖の場としてもふさわしい河川整備及び流域全体としての生態系ネットワークのあり方検討会, 2024.
- 97) 後藤勝洋, 片渕公淑, 今村公史, 福岡捷二: 六角川高水敷に設置された湛水池群による洪水水位低減効果の評価, 河川技術論文集, 第 31 巻, 2025, (登載決定) .
- 98) 佐藤清一, 吉川秀夫, 芦田和男: 河床砂礫の掃流運搬に関する研究(1), 建設省土木研究所報告, 第 98 号, 1958.
- 99) 福岡捷二: 実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前線と今後の調査研究の方向性, 河川技術論文集, 第 20 巻, pp.253-258, 2014.
- 100) 土木学会水工学委員会, 水工学の今後 10 年の研究課題に関する議論について, 2023.
- (2025.4.3受付)