

石礫河川における土砂管理のための調査、 解析法とダム貯水池からの排砂

福 岡 捷 二*

概 要 流域で生産された土砂は、洪水流とともに河道を流下する。河道における洪水流量と土砂の移動量は、流域の治水・利水・河川環境に密接に関係し、河川計画・河道設計・河川管理を適切に行うための最も重要な項目のひとつである。本文では、特に河川の土砂移動に焦点を当て、治水面、環境面からの流送土砂の役割、どのように土砂移動量を観測、算定し、土砂管理計画を策定し、安全で豊かな環境の川づくりに結び付けるかについて論じている。また、河道とダムの望ましい関係の構築、ダム貯水池内の堆積土砂に対する排砂の重要性を論じ、ダム下流河川の濁水問題の軽減と瀬と淵の回復をもたらしている旭ダムのバイパストンネルを用いた排砂事例を示している。

キーワード：土砂輸送、河川管理、堆砂、排砂、旭ダム

はじめに

わが国の国土は地形が急峻で雨量が多いことから、山地での土砂生産量が多い。これらの生産土砂は出水に伴い流出し、河川域、海岸域まで運ばれ、広域の流砂系を構成している。流出する土砂の量やその粒径等の質は、流域の降雨量、地形・地質、河道構造等の影響を強く受け、時間、空間的に大きく変化する。これに対し、洪水の流量や水位ハイドログラフも流域や河川構造の影響を受け伝播、変形するが、移動土砂の量や質の時・空間変化に比べると連続的で緩やかな変形と考えることが出来る。

流域からの土砂流出は、長い期間にわたって地形を変化させる。時には一回の大出水によって地形を激変させる。これらの地形変化は、下流河道への土砂流出量の変化となって山地から河道を經由し海岸域まで大きな広がりをもつ。このため土砂移動が人々の生活に与える影響は大きく、また水域に生きる動・植物の生息・生育、繁殖環境にも影響を与えている。したがって、土砂移動量を広域的にも局所的にも適切に予測し管理することは、安全な国土の保持のみならず、生活環境、自然環境にとって重要である。

河川の実管理としては「河道で起きていること」を正しく理解し、問題があれば対応を検討し、安全で豊かな生産性、潤いのある「川づくり」を計画的に進めていくこと



福岡 捷二

が重要である。

本文では、治水上、環境上重要な役割を持つ河川の土砂の移動に焦点を当て、流送土砂の質と量、ダムからの排出土砂に注目し、ダムと河道の望ましい関係の構築に向けた今後のあり方を論じる。

1. 河川の流送土砂の質と量の変化は、 河道に何をもちたか

河川改修がそれほど進捗していなかった当時、河川の断面形は、支配流量、河床勾配、河床材料(粒径分布)の関係から動的な平衡形状をとっていたと考えられる。しかし、人間活動の活発化等によって河川改修が進むにつれて、川幅が広がり、河道を流れる流量が増大し、連続堤防、護岸等の河川構造物によって、それまでの河道の動的平衡関係が成立しなくなり、河川管理上の多くの問題が生じてきた。その最大の理由は、河道は人為によって変更が可能であるが、河床を構成する材料は、河川上流部の流域地形や地質により規定されており、改修に合わせて主要な粒径集団等を自由に選ぶことが出来ないことによる。その結果、今日では、洪水外力の増大に対し、河床材料の粒径集団が変わらないか、小さくなったことにより河床の低下が顕著になり、主流路の幅の縮小と深掘れによる固定化等が見られるようになり、河川構造物の維持を困難にしている。過去に行われた大掛かりな砂利の採取は、安定な河道を形成するのに必要な粒径集団を河道外に持ち出し、河床を低下させると共に洪水流量の変化に対する河床の応答の柔軟性を失わせることになった。さらに、ダムの建設は、上流から輸送されてくる土砂をダム貯水池内に堆積させ、ダム下流の河道区間の河床低下、局所洗掘を促進させ、海岸浸食をもたらした。このため、河川・海岸構造物等の管理を難しくしている。この問題を軽減するには、ダム貯水池からの排砂等に真剣に取り組まなければならない。

2. 石礫河川の河床変動解析法

河川上流域の主要な河床材料は、一般には、石礫(礫径：0.2 cm～7.5 cm，石径：7.5 cm 以上)である。石礫河川の土砂移動機構は、中、下流域で一般に見られる砂礫河川(砂径：0.074 cm～0.2 cm)の土砂の移動機構と大きく異なる。すなわち、石礫河川では、大きな掃流力が働くと同河床に一部埋もれていた粗石、巨石が現れ、それらが流れの掃流力を受け持つようになる。中小の砂礫は、高い掃流力下でも大きな粒径集団の背後や空隙内に留まり、遮蔽され、その一部は流送されることなく河床に留まることが出来る。その結果、大小の石や砂礫が適当な割合で河床に存在し、安定した河道を形成する。一方、砂礫河川では、河床材料の粒径が石礫河川に比して相対的に小さいために小粒径集団に対する遮蔽効果が小さく、洪水時の流れの限界掃流力に相当する粒径群より小さい粒径集団は、容易に移動し大きな河床変動となって現れる。このように石礫河川は、流れの掃流力が限界掃流力を下回るまで砂礫が移動し、大きな河床変動となって現れる砂礫河川と大きく異なる。これまでは、石礫河川の土砂移動と河床変動の実態がよく理解されていなかったために、砂礫河川の土砂移動に関する解析の枠組みが石礫河川にも準用されてきた。しかし、上述の輸送機構のゆえに、石礫河川では、砂礫河川に用いられて来た河床変動解析法の適用性が低いことが明らかになった¹⁾。

長田、福岡²⁾は石礫河川の土砂移動機構を常願寺川、札内川等で詳細に調べ、石礫河川の土砂移動、河床変動を説明する石礫河川二次元河床変動モデルを構築した。この解析モデルは石礫河川に係る多くの治水・環境上の問題の解決に用いられ、健全な石礫河川の川づくり実現の有力な手段を与えている^{3),4)}。

石礫の存在は、河床の安定性のみならず、魚や底生動物の生息・繁殖環境にとってもきわめて重要である。大きな石に作用する流れは、その周囲にある砂礫を浮石状態に保ち、産卵、生息場を創出することは良く知られている。豊かな石礫のある河床は、治水と環境の両面から望ましい河道であることを十分認識し、まずは、少なくとも石や礫を川から持ち出さない等、やれることから進めていくことが大切である。

3. 総合土砂管理計画策定の必要性

わが国の河川流域には、多くの重荒廃地があり土砂生産量が多く、下流の市域に与える影響が大きい。そのような地域では直轄砂防事業として砂防堰堤等の砂防工事が行われてきた。昭和30年代から40年代始めにかけて、高度経済成長を背景に大量の河川砂利採取が行われ、河床が低下した。このため、海岸に到達する土砂流出量が減じ、結果として沿岸漂砂量の減少となって海岸の前浜の著しい後退、深刻な海岸浸食をもたらすようになった。これに対して、山地から海岸までの流砂系全体としての土砂移動の実態解明が試みられてきたが、観測データの不足や解析技術上の制約もあって、十分な成果が上がっていないのが現状

である。また、河川や海岸の管理者は対策を行ってきたが、十分な成果を上げるには至らなかった。このような中で、国は、総合土砂管理計画を策定する河川流域を指定しているが、安倍川流域のみが平成25年7月に「安倍川総合土砂管理計画」を策定している⁵⁾。

安倍川総合土砂管理計画について、その実効性を高めていくためには、計画に用いた解析モデルの検証、精度向上を図り、河道、海岸の形状変化観測および構成する粒径集団のモニタリング、支流を含む流域の土砂観測データの収集等が引き続き必要であること、その中で、砂防域、河川域、海岸域それぞれの区域で流れと土砂に関するデータに観測密度や観測精度に差があり、この点に留意したデータ収集が必要なこと、また、海浜の安定に河川からの流出土砂の内のどの粒径集団が支配的なのかについてさらなる理解が必要なこと等、これまで以上に砂防、河川、海岸間での一体的な検討とデータ収集が求められている。

今後、総合土砂管理計画が順次策定されていくことになるが、流域の形態、土砂生産量、貯留施設の存在分布等によって総合土砂管理計画モデルの構造は異なるが、基本的な考え方は「安倍川総合土砂管理計画」で検討されたものと同じであると考えてよい。しかし、本川にダム群がある河道の総合土砂管理計画の策定は実効性の面から容易でない。このため、流域全体での総合土砂管理計画の策定を、必ずしも優先しなくてもよいと考える。要は、土砂管理計画策定の必要性の度合い、対象流域で必要データがどの程度準備されているか等によって検討方法が異なる。まずは、土砂管理の緊急性の高いダム下流等の本川河道について、土砂管理計画を作り、次にダムでの堆砂量等を考慮して順次上流河道域に遡って管理計画を作り、最終的には、それらを総合化して流域全体の土砂管理計画としていく段階的な検討の仕方があってもよいであろう。

4. ダムからの排砂問題と旭ダムバイパストンネルによる下流河道の瀬淵の回復

河道を健全に保つには、河川の土砂移動量を出来るだけ自然に近い状態に維持することが望ましい。ダムは、河川の治水、利水、環境上重要な役割を果たしている。一方において、貯水池内に堆砂をもたらす土砂の移動を著しく不連続にしている。現在、排砂施設のあるダムは数えるほどであり、それらから排出される土砂は、河床の安定を支配する大きな粒径の集団は少なく、砂やシルト等の細粒土砂が主体である。排出される土砂の質と量は河川の治水、環境面から特に重要であり、今後の重要な検討課題である。

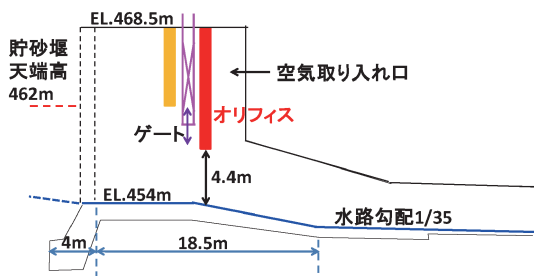
最近、堆砂対策、環境対策として流水型ダム(穴あきダム)が注目されているが、流水型ダムについても解決しなければならない課題がある。代表的な課題は流水型ダムでの石礫の排出の確保である。排砂施設の構造等も流域、流入土砂の特性や目的に応じて多様な選択が望ましい。例えば、ダム貯水池内では河道の平面形に応じて土砂の堆積地点がおおよそ定まる。この位置に排砂バイパス入り口を作ることも考えられる。しかし、排砂バイパスの延長が長くなり経済性からみて問題があることから、トンネル仮排水



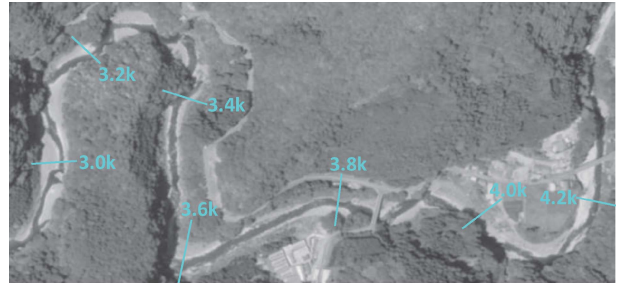
図一 旭川周辺地図(左)と排砂バイパストンネル平面図(右)



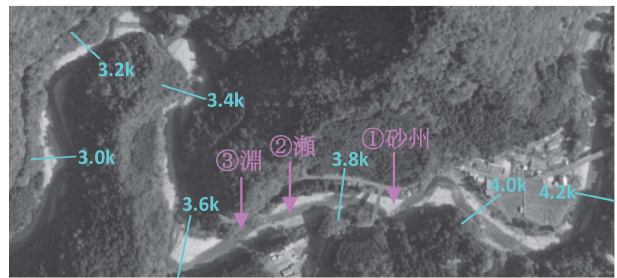
写真一 上流側から見た呑口部(左)と吐口部(右)



図二 呑口構造図



(a) 平成 6 年 5 月



(b) 平成 16 年 5 月

写真三 3.0k~4.5k 付近の河道状況

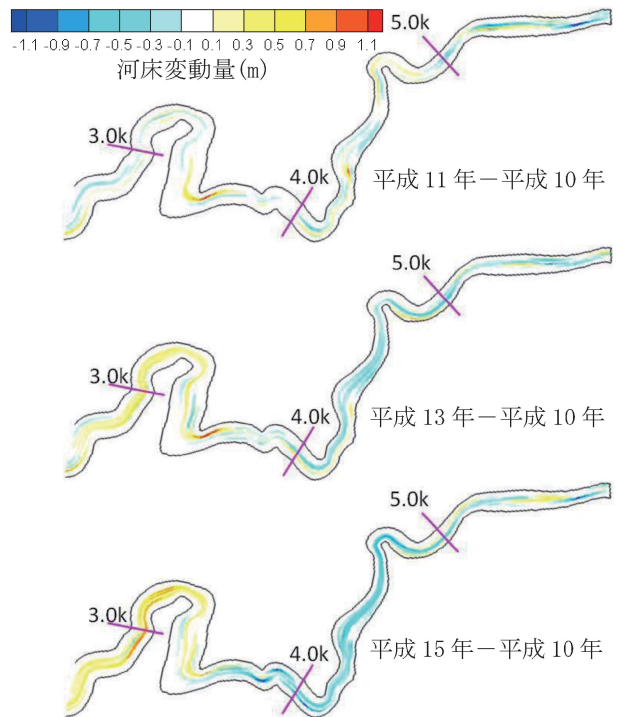


(a) 平成 6 年 5 月



(b) 平成 16 年 5 月

写真二 ダム直下流の河道状況



図三 ダム下流河道の河床変動量(平成10年基準)

路を排砂バイパスとして用いること等をダムの設計段階から考えてよいであろう。

ダムからの排砂の実例として、新宮川水系旭川に建設された関西電力の旭ダム排砂バイパス水路について示す。

新宮川水系旭川は、蛇行が著しい砂州の発達及び瀬淵の形成が顕著な河川である。旭ダムは旭川 6.0k 付近に設置され、瀬戸谷川に設置された瀬戸ダムを上池とする揚水発電ダムとして昭和53年に運用を開始した。しかし、旭ダムによって、ダム貯水池の濁水の長期化、貯水池の堆砂、ダム下流河道の砂州の縮小及び瀬と淵の減少といった環境上の問題が顕著になった。特に、旭川上流部の花崗岩地帯より生産される白い石礫が、下流河道に運ばれなくなったことから、旭川特有の白い砂州による瀬と淵が縮小化しほとんど見られない状況となったことから、濁水の長期化軽

減と下流河道の瀬淵回復等を目的として、平成10年に排砂バイパストンネルが設置された⁶⁾。

図一に旭川周辺地図と排砂バイパストンネル平面図を示す。排砂バイパストンネルは全長2,350m、幅3.8m、水

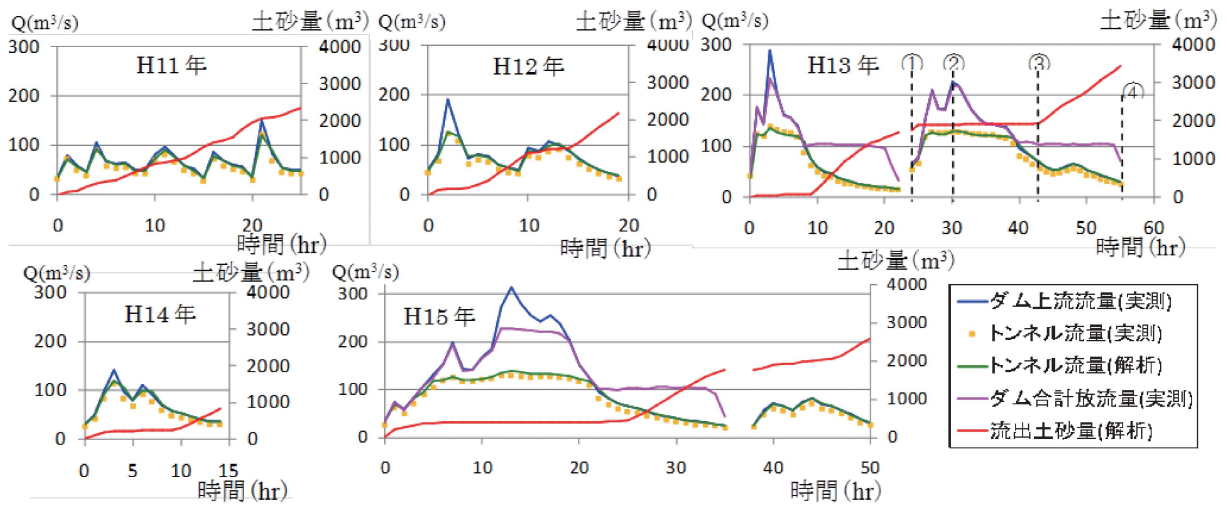
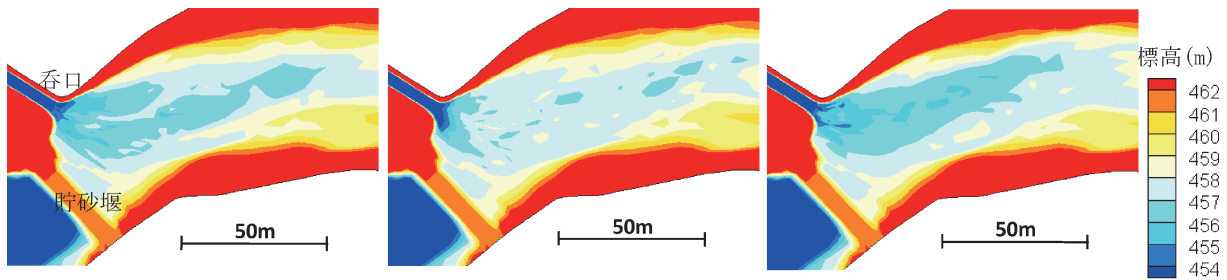


図-4 洪水流量ハイドログラフと排砂バイパストンネルからの排出土砂量ハイドログラフの関係



(a) H13年2波目初期(図-7の①) (b) H13年2波目19時間後(図-7の③) (c) H13年2波目31時間後(図-7の④)

図-5 呑口部上流の洪水時の河床高変化(平成13年2波目洪水)

路勾配 1/35である。写真-1に、呑口部および吐口部を示す。呑口部には貯砂堰が設けられ、流下土砂のダム貯水池への流入を防いでいる。図-2は呑口の詳細図を示す。呑口に設置されたオリフィスにより、流量が約120 m³/sを超えるとオリフィス流となり、また、空気取り入れ口を設けることで、トンネル内が開水路状態を保てるように設計されている。図-3は、ダム下流河道の平成10年の河床高を基準に作成した各年の河床変動量を示す。図-3の平成15年-平成10年が、写真-2、写真-3で示した平成16年5月の状況に対応する。後述するように、平成13年と平成15年に、ピーク流量が250 m³/sを超える洪水が発生し、下流河道の変動量も大きくなった。平成15年の段階では、3.8 k~5.0 k区間で河床低下が顕著であり、3.8 kより下流では、堆積傾向となっている。

このような河床変動が、どのような流量・土砂移動(土砂排出)のもとで生じ、また、バイパストンネルから排出された石礫は、どのような河床粒度分布等を形成しながら移動し、下流河道の瀬淵の回復に至ったかを長田・福岡²⁾による非定常平面二次元洪水流解析法と石礫河川の二次元河床変動解析法を一体として扱う手法により検討し実測値と比較し説明する⁷⁾。

図-4は解析対象とした平成11年から平成15年までのダム上流の流量ハイドログラフと、排砂トンネルからの流量・土砂排出量の関係を示す。図-5は、呑口部上流の洪水時の河床高変化(平成13年2波目)を示す。排出過程の

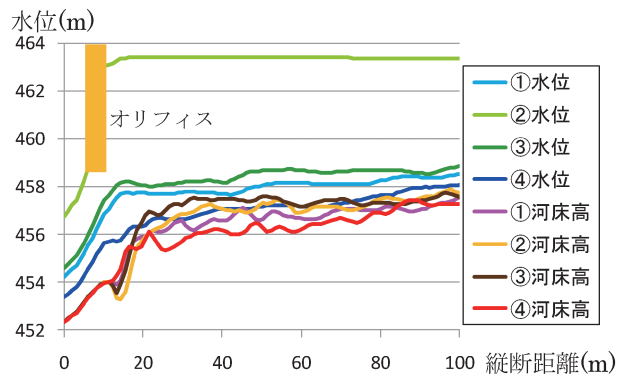


図-6 洪水中(平成13年2波目)の水位・河床高変化(凡例の①~④は図-7に示す時間に対応)

特徴は、上流からの流入流量が多くオリフィス流(120 m³/s以上)になる時間帯の土砂排出量は少なく、流入量が70 m³/sを下回る洪水減水期に多くの土砂が排出される。図-6には、各時刻(図-4 H13年の①~④)の水位・河床高の縦断分布を示す。図-7②の水位に示すように、オリフィス流になる時間帯では、呑口上流河道は、水面勾配がほとんどない状態になるため、上流から流下する石礫は、呑口部まで到達できず、上流側に堆積する。図-7③の時間帯になると、水面勾配が付き、上流に堆積した石礫は呑口部付近に運ばれ、図-5(b)のような状態になる。③から④の時間帯では、呑口部の水面勾配が大きくなるため、呑口上流に堆積した多くの石礫が排出される。

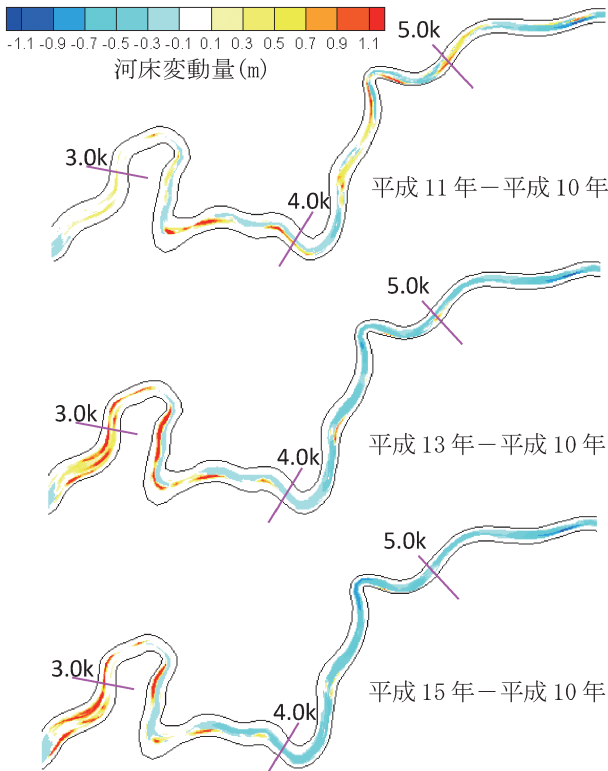


図-7 解析によるダム下流河道の河床変動量

図-7は、図-3の実測値に対応する解析の河床変動量を示す。図-3の実測変動量のように、年度ごとに堆積域が下流へ進行し、4.0k~5.0k区間で洗掘が進行する過程が再現されている。ただし、堆積分布は、例えば平成15年の実測値では3.6kより下流河道で、縦横断的に平均的に堆積する傾向となっているが、解析では、蛇行の内岸にあたる箇所、集中的に堆積する結果となった。この区間は、突出した岩や狭窄部が特に多い箇所、それらの作用で堆積しやすい区間となっているが、その影響が十分反映できていない状況にある。

以上の検討から、旭ダムにおけるバイパストンネルによって旭川に排出される石礫の量と質は、下流河道の砂州の発達と瀬・淵の回復に有効に機能していることが示された。さらに、長田、福岡の石礫河道の解析法は、バイパストンネルを用いた石礫の排砂や石礫河川の河床変動を適切に説明できることを示した。

5. 河川の土砂環境変化の調査・研究の推進

大規模な洪水が発生すると多量の土砂が移動することにより河道の状況が大きく変化し、時には、危険な状況を引き起こすことがあることを示した。このような河川の土砂移動に起因する問題が顕在化する中で、洪水流下能力の増大のために多くの河川で河床掘削が計画されている。しかし、掘削断面が維持可能かは、土砂移動の観点から十分に検討されなければならない。河川整備基本方針の「河川の総合的な保全と利用に関する基本方針」では「上流から海岸までの総合的な土砂管理の観点から、河床材料や河床高等の経年的な変化だけでなく、粒度分布と量も含めた土砂移動の定量的な把握に努め、流域における土砂移動に関す

る調査・研究に取り組むとともに、河道の著しい侵食や堆積のないような河道の維持に努める」として、河床材料の質と量に着目した土砂移動に関する調査・研究の必要性が強調されている。

顕在化している土砂問題に対して、従来の検討方法に頼るのではなく、新しい視点での調査・研究、技術開発が推進されなければならない。本文で述べた上述の議論に加え、以下の3点が新しい技術検討課題として位置付けられる必要がある。

(1) 流域全体を考慮に入れた河川計画

これまでの河道計画は、中流域、下流域中心に作られてきており、上流域を含めた流域一貫した河道計画の検討が不十分である。豪雨による洪水流は、河川上流域で発生するのが一般的である。急勾配で縦・横断的に変化する複雑な線形の上流域河道での洪水流は、緩やかな勾配の下流域とは異なった挙動を取る⁸⁾。同様に、上流域の土砂移動も、そこでの洪水特性、河床材料特性から中・下流のそれと異なった挙動をとると考えられる。しかし、これらは、中流・下流の河床材料粒度分布や土砂移動量特性に影響を与えている。したがって、上・中・下流の各河道区間の洪水流、土砂移動は、つながりを持って扱うことが必要であり、流域全体を考慮に入れた河川計画が検討されなければならない。

(2) 実用的な河床変動解析の精度向上

治水計画の検討や河川管理を適切に行うために、洪水流解析、河床変動解析技術が多用されるが、解析のもつ信頼性と限界性が解析結果の解釈に反映されなければならない。近年、簡易な圧力式水位計を用いて、洪水時の水面形の時間変化を観測し、これより河川管理の基礎的情報を得ている。一般に、河床変動解析では、洪水後に測られた河床の形状が洪水中に起こった河床形状であるとして解析結果の検証に用いられることが多い。しかし、洪水中の河床変動が大きい場合には、洪水後の河床形状は洪水中の河床状況を表わしていないと考える必要があろう。このような場合には、これまでのように洪水ピーク流量時の河床変動計算結果のみで解釈するのではなく、洪水流の観測水面形の時間変化を説明するように洪水流と河床変動の時間変化を同時に解くことによって、洪水流と河床変動はどのようなものであったかを見て判断することが大切である。特に、ダム貯水池を含むその上流、貯水池区間、下流河道区間の間の洪水の変形や土砂移動と河床変動、合流・分流を含む河道区間のように流れの境界条件の時間変化が河床変動を規定する区間では、洪水流と河床変動を同時に解析して、現地での実測洪水流水面形の時間変化を説明できる河床変動結果が、各時間の河床変動を表しているという解釈が行われるようになって来ている⁹⁾。今後、多くの河川で同様の検討を行い、土砂移動量に関して確かな情報が得られることが期待される。

(3) 河道と河川構造物を一体的に捉えた水理システムとして河川を見る

河川は、様々な大きさの洪水を安全に流すことが求められている。それゆえに設計、施工、管理が適切に実行され

なければ、大きな災害につながる。河川の主要な施設は、土を材料とする堤防と河道であり、その管理延長は著しく長く、そこには護岸、堰、樋門、樋管、床止、橋梁等の多くの構造物が存在する。これら構造物の周囲は、土から成り、浸食や洗掘を受けやすく河道の弱点部となり危険性が高いことから、河川施設の管理に当たっては対象施設周辺の水理現象を見るだけでなく、その上下流の河道平面形、縦断形、流れと土砂移動の状況を広範囲に見て、河道と構造物が一体的な水理システムとして機能を発揮し、安全であるように管理をしなければならない。ここに、自然公物である河川の管理が、人工公物である他の土木施設の管理と異なる点がある。これらを適切に管理するためには、観測データを時空間的によく見て、変化の原因を考え把握することが重要であり、これには経験と共に基礎的、技術的な判断力が求められる。河道の縦横断測量データを経年的に重ねて変化の傾向を調べ、特に洪水による河道変化の状況をつかみ、河道と構造物を一体システムとして、確実な維持管理に繋げることが重要である。このためには、洪水と土砂移動の解析技術も、大きなスケールから小さなスケールまで時空間的な広がりを持った現象の集まりからなるとして河道における水理現象を水理システムとして捉える解析法が提示されている¹⁰⁾。この成果は、平成23年の新潟・福島豪雨災害での信濃川の対策検討に活用され、多くの新しい成果と教訓を得ている^{11),12)}。

あとがき

本文では、河川の土砂流送に関わる諸問題を論じたが、密接に関連するダムに関する議論が十分できなかった。近年、ダムに関わる水理面からの調査、研究が著しく減少しており、これは深刻な問題である。ダムの水理現象には地道に進めなければならない多くの課題がある。例えば、ダム貯水池に入ってくる流量ハイドログラフを正しく求めることは、ダムの持つ機能と重要性から明らかである。しかし、洪水の流入により時空間的に変化する貯水池水位をダム近傍の1点で観測した水位を用い、貯水池水面が水平に上昇するとして流量ハイドログラフを求めているが、このことに問題は無いのであろうか。これは一例であるが、次のようなことも考え、調べてみることも大切である。

貯水池に流入・流出する河川の洪水時の縦断水面形の時間変化を多点で同時に観測すれば、観測した水面形時系列データを用い流入河川、貯水池内、下流の流出河川について洪水流解析を行うことにより、貯水池内への流入流量ハイドログラフを高精度に求めることが出来る。求めた貯水池流入流量ハイドログラフより、現行流出解析モデルの解析流量精度の検証と改良を行えること、ダム下流河道にも本解析法を適用することにより、下流流量ハイドログラフを知り、ダムからの放流量ハイドログラフの算定精度の検証とその改良を図れること、さらには、ダム上下流の流量

ハイドログラフを高精度で算定することにより、ダム貯水池内の洪水位・洪水流量ハイドログラフの伝わり方を正しく把握する方法を確立できること等、従来の算定方法が持つ精度、課題を明らかにし改善を図ることが可能になる。

参 考 文 献

- 1) 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、44、A-1-1～25、2008。
- 2) 長田健吾、福岡捷二：石礫蛇行河川の二次元河床変動解析法に関する研究、河川技術論文集、第15巻、pp 327-332、2009。
- 3) 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。
- 4) 福岡捷二：札幌川内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、研究紀要(XXIV)、北海道河川財団、pp. 123-164、平成25年12月。
- 5) 安倍川総合土砂管理計画：中地方整備局静岡河川事務所、平成25年7月。
- 6) 竹中秀夫、岡崎和樹、與田敏昭：旭ダムバイパス放流設備運用後の下流河川環境調査結果報告(中間)、電力土木、No. 309、pp. 112-116、2004。
- 7) 長田健吾、福田朝生、山下克己、福岡捷二：旭ダム排砂バイパストンネルによる石礫の排出機構および下流河道の瀬淵の回復、水工学論文集、第56巻、I_1105-1110、2012。
- 8) 竹村吉晴、福岡捷二：洪水流の流量と水位ハイドログラフの変形・伝播に及ぼす河道構造の影響—山間峡谷河道を対象として、土木学会論文集 B1、Vol. 68、No. 1、pp. 35-54、2012。
- 9) 福岡捷二：河道設計のための基本は何か—水面形時系列観測値と洪水流—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。
- 10) 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、I_1225-1230、2012。
- 11) 田端幸輔、福岡捷二、内藤和久：平成23年7月豪雨による信濃川下流域の洪水流下特性とその解析法—五十嵐川、刈谷田川の合流と中ノ口川の分派を含む河道区間を対象として—、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 69、No. 4、I_787-I_792、2013。
- 12) 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. 170、No. 4、I_1483-1488、2014。