

水系一貫土砂管理・制御と河川水理学の課題

Sediment Management and Control along Rivers and Contribution of River Hydraulics

辻本哲郎¹

Tetsuro TSUJIMOTO

1. はじめに

従来の土砂管理は砂防領域、ダム周辺、河道領域、海岸領域と別々に考えてきたが（表1）、各領域のさまざまな問題は水系一貫した管理や制御なしには解決しにくくなってきている。たとえば、ダム領域を対象としたとき、その堆砂問題は上流の砂防計画に依存するし、排砂も下流河道のさまざまな側面への影響に対する対策なしにありえないし、河道、海岸領域もダム貯水池からの土砂供給を想定しなければとくに生態系保全を含む持続的開発（sustainable development）を実現するには不可避の問題である。このように河川管理がこうした意味での多機能を指向し、また後述のようにそのために潜在自然型河川をひとつの目標に設定する中において水系一貫土砂管理は大きな鍵となっている。

表1 水系のさまざまな領域での土砂問題

拠点	土砂	水
砂防領域	崩壊・地滑り・土石流	流出
ダム周辺	貯水池堆砂、排砂	流入／放流
河道区間	河床変動	ダム放流
海岸領域	海岸侵食	

一方、時間スケールで見るとここ数10年にわたり多くの河川は、上流域砂防の充実、ダム貯水池での土砂供給減で河床低下の傾向にあるものが多い。とくにダム建設による土砂扞止は河床低下以上に河相（水流、土砂、流路形態）に加え河川の植生相、さらには生態系を変化させている。こうした数10年を時間スケールとする問題がクローズアップされている一方、平成7年7月には2日間局地雨量600mmを越す豪雨で、北陸諸河川上流域では大規模な山腹崩壊、土石流が約600~1,000万立方メートルの土砂を生産、河道の急激な上昇とそれに伴うさまざまな河川災害をもたらした^{1), 2)}。これは短い時間スケールの現象である。この事例のなか

表2 水系のさまざまな領域での土砂問題における時間スケール

拠点	長期	短期
砂防領域	砂防計画	砂防ダムの満砂状況
ダム周辺	計画堆砂容量と排砂計画	洪水時の大量土砂堆積と緊急排砂
河道区間	長期河床変動（計画河床）	局所洗掘、河岸侵食
海岸領域	海岸侵食	河口砂州の破壊

キーワード：土砂管理、水系一貫、土砂災害、河相、河川景観管理

¹ 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科（〒920 金沢市小立野2-40-20）

で姫川は下流まで大量の土砂が流出して下流まで河川災害をこうむったが、黒部川では出し平ダムが約300万立方メートルの土砂を貯水池に堆積させ、黒部川扇上地部での河道災害は比較的軽微であった。こうした災害の軽減や防止のためにはカタストロフィックな現象に対しても水系一貫した観点に基づく対策が検討されようとしている。

すなわち本論文では、時間・空間的なスケール、河川の機能という複数軸の接点の上で、水系一貫土砂管理の必要性を検討し、さらにその技術に貢献する河川水理学の課題を考える。また水、水質汚濁物質、生態を含めた流域循環管理のなかでの水系一貫土砂管理の役割についても考えたい。

2. 河川が多機能と土砂管理

河川管理・整備の新しい理念は河川の治水、利水、環境（親水、生態環境保全）機能のすべてを等しく向上させていこうとすることであり、これによって持続的発展（sustainable development）を可能にしようとするものである。このためには、新しい意味（本来の意味）での河川景観管理を的確に行う必要がある。すなわち、水流、土砂、流路形態（河道形態）、植生の相互作用系が生息環境を提供し、そこに生態系が成立している姿で^{3), 4)}、その保全の上でこそ、多機能を同時に考え得るのである。玉井⁵⁾の提唱する潜在自然型河川はここでいう河川景観とあい通ずるところがある。こうした景観は水系のなかで個々のセグメント⁶⁾にあった特性を呈している。セグメントの景観は主として河床勾配、河床材料構成で性格付けられ、地形、水流の空間分布がもたらされそれに応じた水辺植生、水中生物の生息環境を提供しているほか、それが上流から下流へと役割を分担しながらつながっているという特徴がある。土砂の供給形態の変化は、およびそれにも強く影響する流況の変化はこうした各セグメントの特徴（さまざまな相互作用で形成された景観）を変質させるし、またセグメントの連続にも変質をもたらす。

近年の河相あるいは上記の河川景観の変質はダム建設に原因していることが多い。ダム建設は砂防の拡充とともに河道への供給土砂を激減させ、慢性的な河床低下さらには海岸線の後退をもたらしている（河床低下には一般には砂利採取がより大きく影響している場合が多く、砂利採取規制後河床低下傾向の鈍化した例

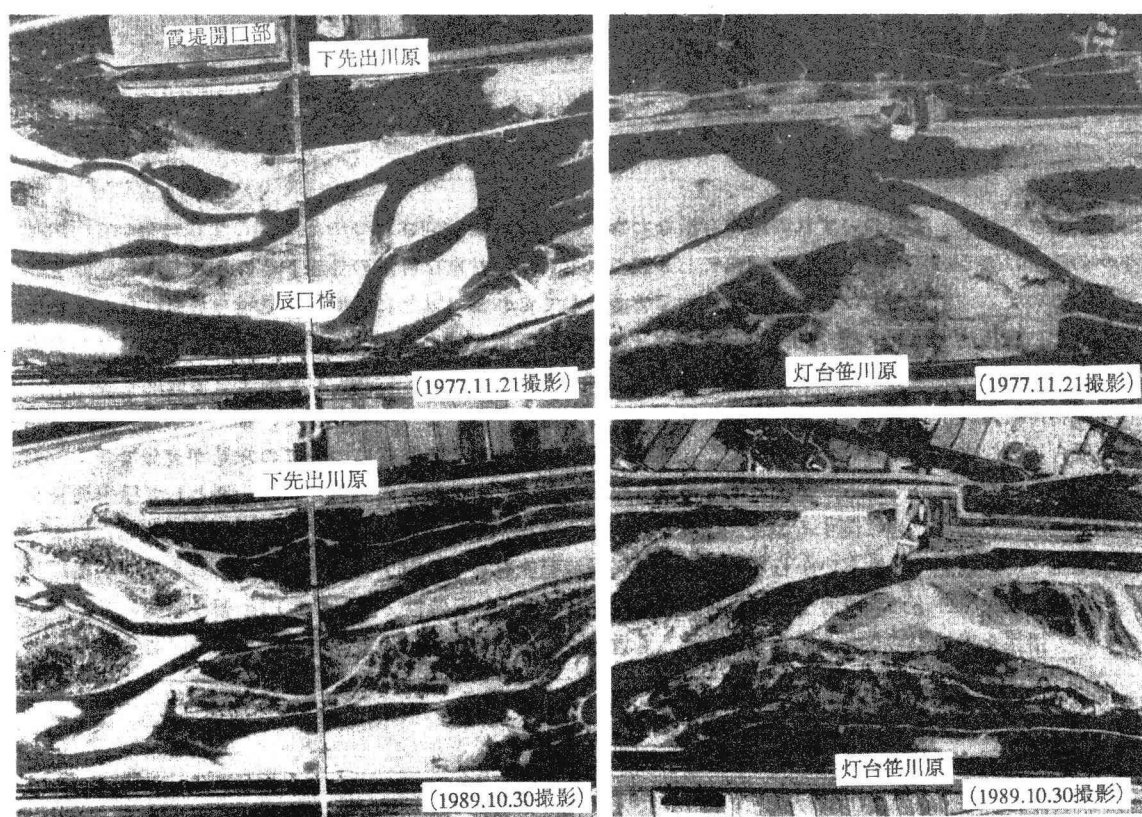


写真1 手取川におけるみお筋変遷と河道植生の変化（1977, 1989撮影の航空写真の比較）

が多い)。慢性的な河床低下は護岸・水制など河川構造物災害の誘因となるし、利水にも不便をもたらしている。しかし、それ以上に河川景観をすっかり変えてしまっている場合がある。すなわち、とくに扇状地河道では、みお筋の固定化、河川敷、中州での植生の繁茂、表層土質の変化（細粒化）と植生の変化（陸性植物への遷移）がみとれる。手取川を例にとるとたとえばダム建設後、土砂はダム貯水池で扞止され、また大出水の頻度も減少した。手取川扇状地区間の河相の変化は次のとおりである。河床礫はもはや流されることは少なく、小粒径の礫、砂は河床にはあまり見られない一方、植生周辺や河川敷には細砂（中小洪水時にウォッシュロードとして流されていたものでこれだけが上流から供給される）。もっとも河道には侵食に供される材料は残存しており、河川敷の河岸侵食が洪水後に見られる）。頻度が減った洪水のあいまに植生の繁茂が著しい（写真1参照、手取川クラスの扇状河川では中洪水でもかなり植生の破壊が見られ、他の河川のようにダム建造後単調に植生繁茂が進んだわけではない）。このようにとらえられた河川景観は土砂供給状態で大きく変遷する⁴⁾。こうした河相の応答は流況（洪水と低水の繰り返し）と土砂供給状態に大きく依存しているし、一方、これは生息環境の変化ももたらしてい

こうした河相、河川環境の変化は、供給土砂や流量変動に対する水流、流砂、流路形態、植生の相互作用系の応答として解析されるようで、従来の移動床水理の対象であった水流、流砂、流路形態の相互作用に及ばず植生の影響として研究されつつある^{4)、7)、8)}。植生による周辺流速の低減とそれによる周辺の河床変動の鈍化が素事象で、堆積の進んだところには植生の進出、植生周辺部から流量が集中してきた部分の河床低下の進行が洪水と低水の繰り返しにより段階的に進むのが特徴となっている。著者らは、植生周辺の流れの解析と河床変動解析を融合させた数値解析と実験室水路で陸化による植生繁茂を模擬植生を人工的に付加することで表し植生に影響された移動床過程の再現を行っている。植生域下流部へのウォッシュロード堆積による中州の発達⁷⁾、土砂供給の停止した河道で植生に影響されて洪水時に河床低下が流路中央に限定されこの繰り返しによる段のあるテラス地形の形成⁸⁾（写真2参照）などが取り扱われた。



写真2 模擬植生による植生域拡大過程をとりこんだ河床低下の実験

3. カタストロフィックな土砂災害と水系一貫土砂管理

3. 1 平成7年7月の北陸河川災害

平成7年7月梅雨前線北陸地方に梅雨前線が停滞し、平成7年7月11日から12日にかけて関川・姫川・黒部川（各河川の諸元は表1に記載）流域では観測史上最大規模の強い降雨（図1は平成7年7月10日から13日までの降水量の空間分布²⁾）があり、大きな河川災害をひこおこした。

いずれの河川も上流区間（本川部分で河床勾配1/30～1/50）で山腹崩壊（写真3）、土石流（写真4）の発生により大量の土砂が生産され、とくに姫川では（崩壊土量約1,000万 m^3 のうち）650万 m^3 、黒部でも樺平～

表1 北陸河川の諸元

河川名	流路延長	流域面積	計画高水流量（基準点）	今回のピーク流量
黒部川	85km	682km ²	6,200m ³ /s（愛本）	2,400m ³ /s
姫川	60km	722km ²	5,000m ³ /s（山本）	2,900m ³ /s
関川	64km	1,143km ²	3,700m ³ /s（高田）	2,600m ³ /s

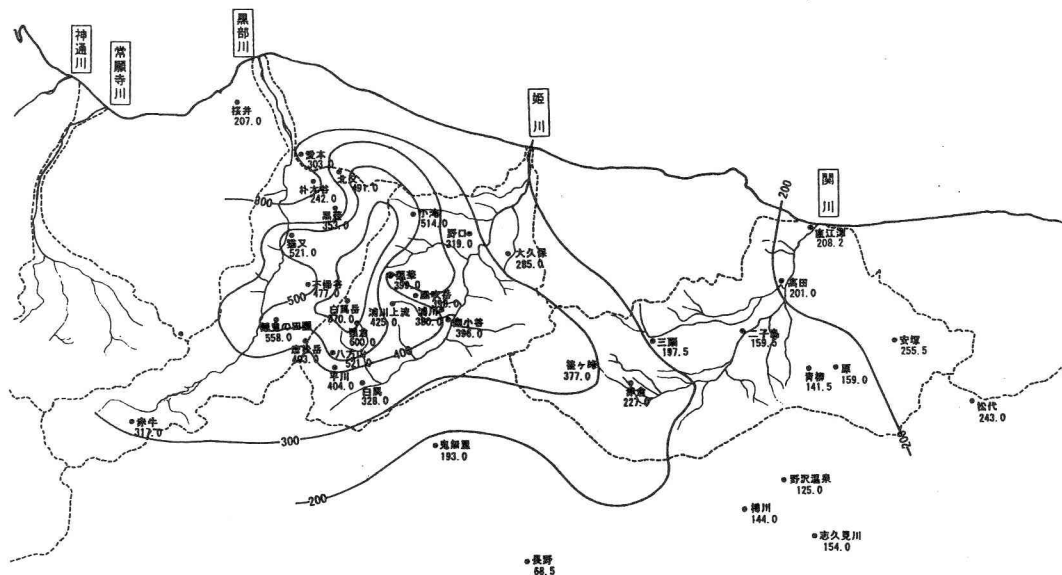


図1 黒部川、姫川、関川流域における平成7年7月10日～13日の雨量分布



写真3 姫川蒲原温泉付近の河岸山腹崩壊



写真4 姫川蒲原沢からの土石流

出し平間で約600万m³の土砂が本川に供給された。これらによって本川で大幅な河床上昇が生じた。図2は姫川の河床上昇量（最深河床高の変化で見たもの）の縦断変化で、上流では10m以上、河口付近ですら数mの河床上昇が生じたことがわかる。姫川・黒部川では上流部で谷に沿ってそれぞれ国道148号線・

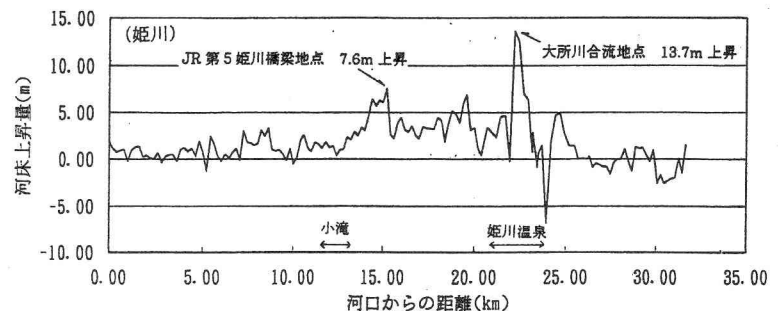


図2 姫川の河床上昇量の縦断変化

J R 大糸線、黒部峡谷鉄道が走っており、軌道、橋梁が埋没したり、水の上昇した激流で路盤が決壊するな

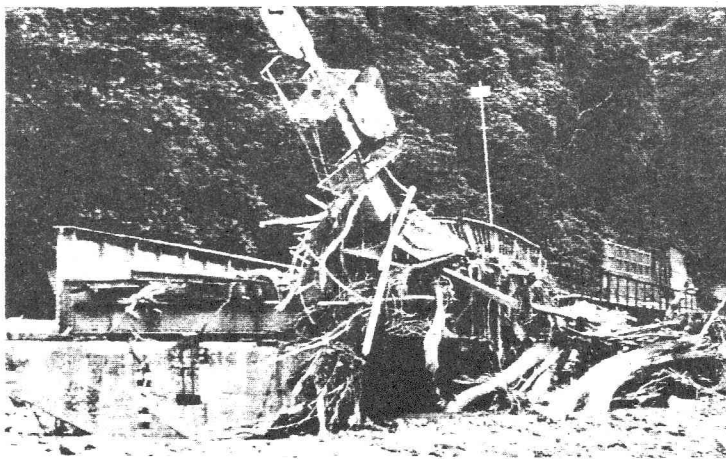


写真5 土砂に埋没し破壊されたＪＲ大系線施設（糸魚川市小瀧）

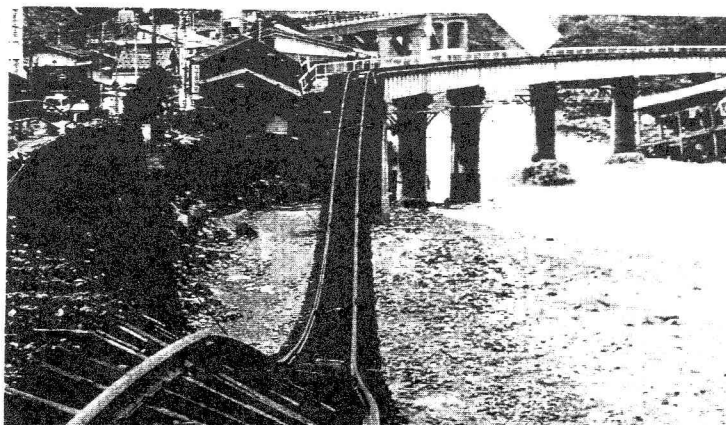


写真6 路盤決壊して宙づりになったＪＲ大系線（糸魚川市平岩）

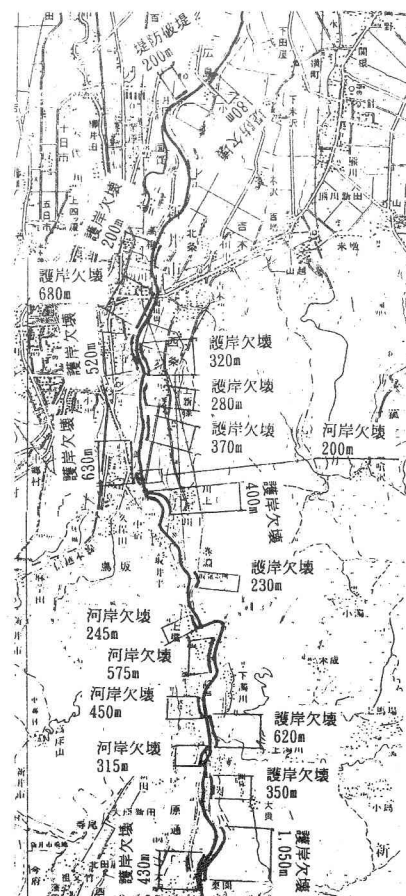


図3 関川沿いの護岸災害

どの災害がおきた（写真5，6）。これ以外に，黒部川では発電取水口の埋没被害が多発したほか沿川の温泉旅館など施設が破壊された。もちろん土石流や山腹崩壊そのものも橋梁破壊（新国界橋）や各所での道路，鉄道切断も生じた。

中流部では，とくに関川において図3に示すように長い河道区間に沿って，護岸災害が連続して生じた。護岸災害は一般に河床低下によって護岸根入れ不足を生じて発生する。ただしここでは河床上昇しており，被災形態が異なるものと推測されたが，（埋没したり流失しているものが多かった）調査によると護岸根の洗掘による被災形式であり，河床上昇傾向であっても局所的には護岸周辺は深掘れしていたものと推定される。

平面2次元の河床変動計算によると河床上昇

時は河床横断形状はかまぼこ型を呈し¹⁰⁾，兩岸付近への流量集中が予想されるし，またこうした形状が2次流を促進して局所洗掘を助長したものと考えられる（一方河床低下時には流路中心に流量が集中，側岸の低下量は小さめとなる）。護岸が被災したところや護岸等のなかったところ，とくに湾曲，蛇行部では側岸侵食が著しく（写真7），河道は洪水によって2-5倍に拡幅された^{1)，2)}。また新井市美守地区では側岸侵食が上流から逐次伝播して交互に生じる興味深い例が見られた（図4参照：新潟県土木部提供）。



写真7 河岸侵食・拡幅（新井市除戸）

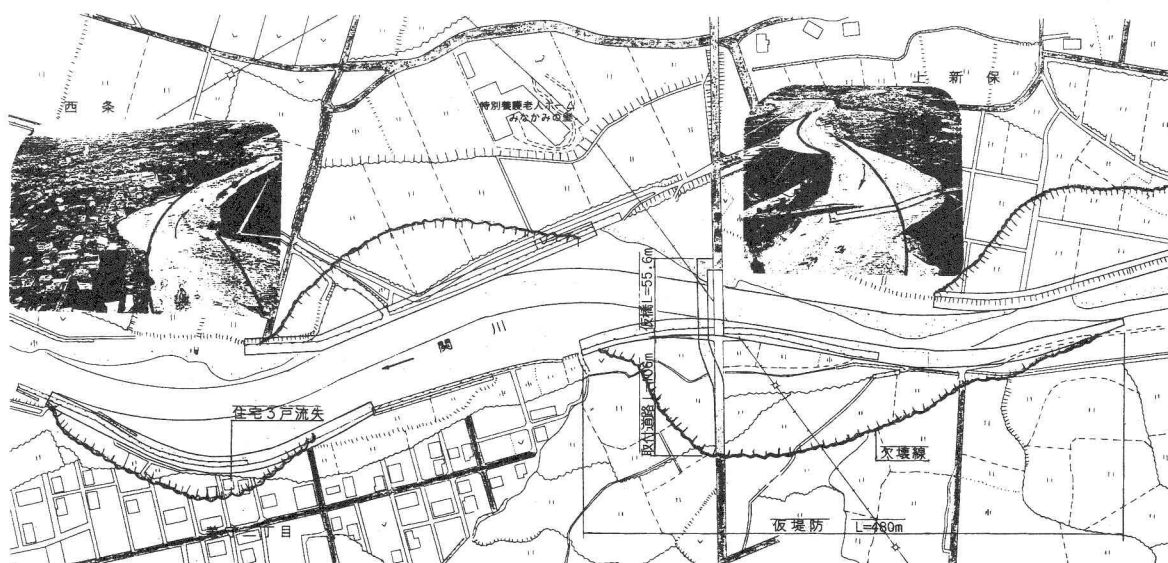


図4 上流から連続しておこった交互の河岸侵食（新井市美守地区）

下流部においても姫川直轄部右岸で上刈地先（水崎地崎／今井橋上流），またそのすぐ上流大野地先でそれぞれ約200mにわたって石張り護岸をもつ堤防が破堤，決壊した．その他でも石張り護岸の欠壊（根固洗掘を含む）は10箇所以上に上っている．

こうした事例調査から上流部で大量の土砂供給があった場合，河床上昇が生じ洪水流は土砂供給の無い場合に比べ大きなエネルギー勾配で流れ，移動床活動（侵食，拡幅，蛇行，洗掘など）を活発化すること，また河床上昇，低下も平面的な捕え方をすれば側岸部の状況は河床上昇であるからといって油断できないし，さらに3次元的な流れの性状も構造物災害に大きく影響すると考えられ，水系一貫の観点からあらゆる土砂供給条件を勘案した研究の取り組みが必要となっている（たとえば橋脚周辺の局所洗掘深さも河床上昇傾向河川と河床低下傾向河川では違うのではないかと考えた観点）．

このように上流部での大量の土砂生産とその本川への供給が本災害を特徴づけたが，黒部川では，途中に出し平ダムがありその貯水池で土砂を扞止し，その下流では上述のような特徴的災害は免れた．出し平ダム貯水池には山腹，渓流から供給された約600万 m^3 の土砂のうち約310万 m^3 が堆積，下流への流下をおさえた．出し平ダムは土砂生産の激しい黒部川にあって計画堆砂容量を十分に設定できずそのため排砂ゲートを備えている．この貯水池へのダム建造後の堆積土砂量の経年

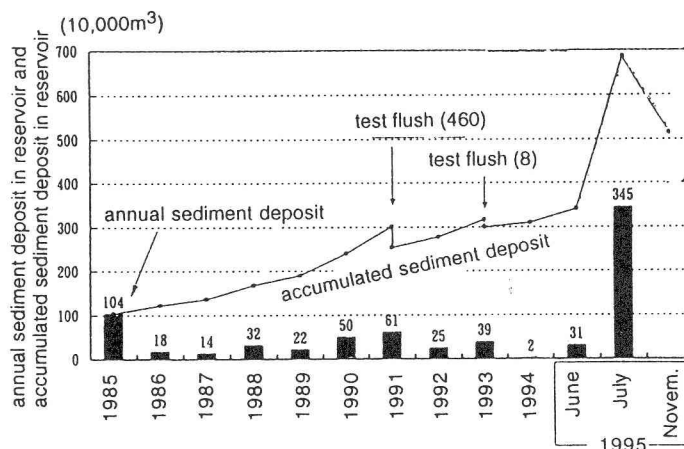


図5 出し平ダム貯水池への堆積土砂量の経年変化

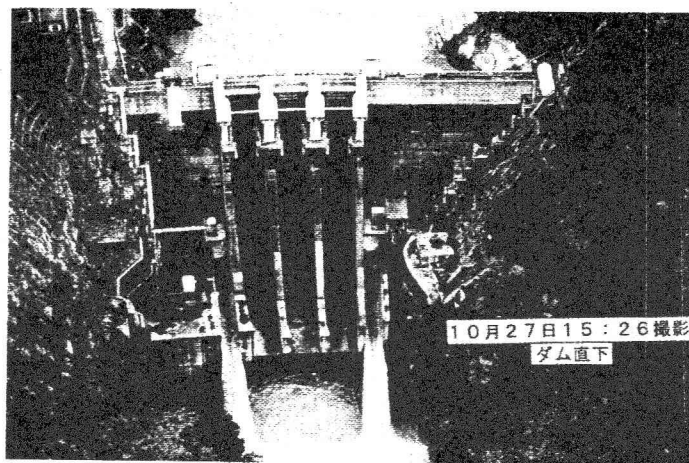


写真8 出し平ダムからの排砂

年変化は図5のようで、年平均で数10万 m^3 で今回の堆積土砂は10数年から数10年分と言った量である。これまで2回試験排砂を行ってきたが、排砂による河川環境経の影響が危惧され排砂方法が検討中であった。今回の洪水後、10月下旬に緊急排砂を行った(写真8)。この結果は図6のように概ね良好で、黒部峡谷鉄道の早期復旧を可能とした。

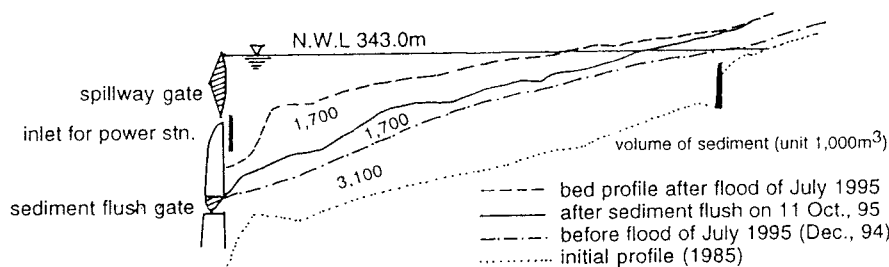


図5 出し平ダムの排砂結果

このようにダム貯水池はカタストロフィックな土砂災害時のひとつの緊急避難的減災効果があり¹¹⁾、今後水系一貫土砂管理の、しかも短期危機管理の線で検討していくべき手段のひとつで、そのためには効率的な排砂機能を持つこと、排砂を下流の河川環境を保全しつつどのように行うか、本川のスリットダム¹²⁾とともに洪水時の水流、土砂移動の非定常挙動についての研究の蓄積が待たれる。長期的な視点でのダムのリフレッシュ(とくに貯水池堆砂対策)、下流河道の河相あるいは景観復元のためにもこうした土砂と水流の人工放流(フラッシュ)は重要な課題である。

なお、とくに山腹崩壊に伴う土砂供給は大量の流木を産み、この洪水でも大量の流木が橋梁、横断構造物、取水施設などのひっかかり構造物災害を誘起した。また洪水後は下流にまで散乱しその収集に苦慮したほか、災害復旧の第一歩としての甚だしい河床上昇の掘削を商業ベースで行うことを困難にした。黒部川では出し平ダムに大量の流木が捕捉され、災害後下流に捕捉用のワイヤーネットを張ってから余水吐から流下させて捕捉、廃棄した例が報告されている。こうした流木管理も土砂管理と総合して考える必要があり、いずれにしても緊急的に土砂や流木を捕捉し、後日安全に流下させる技術の開発が望まれる。

4. 流域循環管理の中での水系一貫土砂管理

我が国では土砂は主として山間・上流部で生産され河川に沿って流下し、河川の景観(河相とそれが提供する生息場での生態、人間社会としての利用:治水機能と利水・親水機能を求めている)を形成している。こうした景観を保全、改良していくうえで水系一貫した土砂管理が必須である。上流、砂防区域では流域という「面」から土砂供給があるが、中・下流では河川に沿っての交換(侵食・堆積)あるいはその不均衡が問題となる。しかし長江やミシシッピー川では支流の発達やその流域から供給される土砂は流域という「面」を対象として総合的な土砂管理、すなわち流域の土砂生産と流失を考えたアプローチでなければならない。こうした意味では「水系一貫土砂管理」というよりも流域総合土砂管理と言うべきだろう。水系一貫土砂管理は土砂収支の不均衡が主としてもたらされるダムを想定しており、既に述べたように流況が土砂不均衡と共に「河川景観」を変質させており、それを是正するというのが目的のようであるが、水という観点でも河道流量の制御だけでの治水から流域総合的なものから考えねばならない面もでてきている。ただしこの場合には、水質管理と一体化したアプローチであるべきだろう。水も土砂も水質汚濁物質も考えて健全な循環を流域で考えていくべきだと思う。さらに、河道に沿って植生が秩序をもって繁茂し、河道とそれに応じて生物が生息している場も、インパクトによって応答して変質を余儀なくされるという観点では河川を軸とした循環といってもよいだろう。すなわち、水系一貫土砂管理も流域総合循環管理の一部であることは確かである。土砂水文学の課題から見れば、水系一貫で基本的な土砂移動を媒介とした河道景観形成過程を理解し、長期計画、短期的危機管理の両面での流域管理に貢献できる基礎を充実させるべきと考える。

5. あとがき

本論文では、流域循環管理のなかで水系一貫土砂管理をとらえ、それが河川の多機能を確保し、長期的、短期的時間スケールでどのように問題意識を持っていくべきかを整理した。事例的で基礎研究をどのように行っていくべきかについてなお抽象的な面もあるが、一方、基礎的な研究を水系一貫土砂管理を支えるといった観点で集約していくシナリオ提案をおこなった。

参考文献

- 1) 芦田和男・辻本哲郎：H7.7.11-7.12豪雨による北陸地方河川の災害特性，平成7年河川災害に関するシンポジウム，自然災害総合研究班，pp.37-58,1996.
- 2) 関川・姫川水系水害・土砂災害対策検討委員会：関川・姫川水系水害・土砂災害対策検討報告書，40p.,1996.
- 3) 辻本哲郎：新しい河川管理の概念とそれを支える河川水理学の展開－生息環境としての河川の景観と管理－，第3回日独河川技術交流講演会テキスト，名古屋，中部建設協会，pp.1-17，1996.
- 4) 北村忠紀・辻倉裕喜・辻本哲郎：河川景観の概念とその管理のための河川水理学，第3回河道の水理と河川環境シンポジウム論文集，1997.
- 5) 玉井信行：潜在型自然川づくりの体系化に向けて，河川，No.598，日本河川協会，pp.61-66,1996.
- 6) 山本晃一：河道特性論，土木研究所資料，第2662号，pp.169-185，1988.
- 7) 辻本哲郎・北村忠紀：植生周辺での洪水時の浮遊砂堆積と植生域拡大過程，水工学論文集，第40巻，pp.1003-1008，1996.
- 8) 辻本哲郎・北村忠紀：河床低下に及ぼす植生繁茂の影響，水工学論文集，第40巻，pp.199-204，1996.
- 9) 河川環境管理財団編：河川の植生と河道特性，河川環境管理財団，資料第1号，127p., 1995.
- 10) 辻本哲郎・大野修：数値計算を用いた河床上昇と河床低下河川の河道特性の比較，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.153-154，1997.
- 11) Tsujimoto, T. : Sediment yield and its behavior along the rivers with and without dam reservoir during flood - Case study for flood of July 1995 in Hokuriku area in Japan -, *Proc. International Conference on Reservoir Sedimentation*, Ft. Collins, Colorado, USA, pp.1391-1400, 1996.
- 12) 国土開発技術研究センター編：姫川水系土砂管理検討委員会資料，1997.