

河道計画が目指すべき方向と技術的課題

Technical agenda for building the new basis of river channel management

藤 田 光 一
Koh-ichi FUJITA

1. 河道計画における水工学の役割

川は国土の中でも特異な場所である。水が流れ、流れ乗って物質が輸送・貯留・供出される事象が日常的かつ支配的に生じる場所として、なおかつ、水と物質が広がりのある場（流域）から流れ込み国土の特徴が凝縮される（ある意味で）場所として、河川は希有な存在である。川と人との関わりの本質的な部分の多くは、この特異性を起源とする。川に求められる要求がどう移り変わろうと、川を“川”として扱う限り、この本質を見据えることは川理解の原点であり続ける。そのための实际的、合理的手段を提供する水工学の重要性は非常に大きい。ただし、水工学は1つの手段であり、水工学的取り扱いと川の理解とを混同してはならない。水工学は、川の理解とそれに立脚した川と人とのより良いかかわりの構築という強い意志の下に開発され、必要なら他の手段とともに使われて、河道計画においてもその真価を発揮するはずである。

河道計画は、新しい様々な要求に直面している。それを敢えてくれば「川らしい川」への要求、期待とすることになるだろう。「川らしい川」とは何か？ それを考える原点は、やはり上述の川の特異性にあるはずだ。もし、国土の川以外の場所でも成り立つような事象が「川らしい川」を目的とした河道計画の対象になっているとすれば、「川らしい川」についての勘違いと見るべきか、あるいは人間系と自然系との対立（まれには親和）という文脈でとらえるべきであり（これ自体が河道計画の重要な対象である）、「川らしい川」の追求のためではないはずである。水工学は、「川らしい川」を追求する上でも本質的な役割を担う。河道計画への新しい要求は、水工学の真価を発揮させる新たなチャンスであり、責務でもある。

これからの河道計画に対しては、従来にも増して、人間系と自然系との折り合いをつけるための、あるいは両者のせめぎ合いの決着点を見出すための作業という認識を明確に持つべきである。このために、川の状態について、人間系、自然系双方から見た場合の満足度（不満度）を評価し、それに基づいて川のあり方、そこに向かう手段をきちんと議論し意志決定する環境をつくることがとても大事になる。水工学は上述の川の特異性を正面から見据える。そうして得られる個別具体の情報は、自然系、人間系双方の満足度（不満度）を測る共通の尺度となる。水工学が、人間系の満足度を測る学問分野、自然系の満足度を測る学問分野とそれぞれ太いパイプを持つことによって、上記の環境づくりのための包括的方法論が確立できるはずだ。水工学は、自然系と人間系とをつなぐ結節点に存在する。

河道計画に貢献する水工学は、河道計画についての構想、価値論と無縁ではいられない。今、自然系や人間系から川に対して多くの構想や価値論が生まれ、議論されはじめている（このこと自身とても良いことだ）。そうした中で、水工学が、客観性、論理性、定量性だけを旗印にし、川がどうあるべきかについて構想するのを避けていると、飛び交う構想力、価値論に圧倒されてしまう恐れがある（それでも、結果として、川の本義に沿った議論がなされれば良いのだが、そうならない可能性も否定できない）。他の系からの構想、価値論に合わせることに汲々とする状況になってしまう恐れがある。自然系と人間系の結節点にあるという水工学の特徴を最大限に生かして、河道計画を骨太に構想し、他の系から興った構想と対峙させ議論することが、上記の“折り合いのつけ方”に上手くなるためにとても大切だ。“構想できる水工学”への期待は大きい。このことで結果として、客観性、論理性、定量性という水工学の特質がもっと生かされるようになると思う。

ただ、この構想や価値論の起点は、眼前の川における諸現象の深い理解にあるべきで、他の分野や外国で生まれた構想、価値論を安易に前提にして、それに合わせて対象とする川を眺め、現象を“確認”するような思考パターンに陥ってはならない。様々な構想、価値論を素直に受け入れ吟味することの大事さは言うまでもないが、その際には、同時に、自前の川の見方を構築する努力を必死にすべきであろう。このために一番大切なことは、目の前の川の現象を長期間じっくり追いかけることである（過去に遡ってもよい）。そこでその川の本質が見えてきた時点で、水工学をはじめとする種々の方法で分析を行い、その結果をもって現地調査へフィードバックをかけるという繰り返し、川の理解には必要だ。川は洪水外力の頻度が小さく展開のテンポが遅いので、一般的に言って 1、2 年程度の現地調査では、大きな変化過程のほんの一瞬をとらえられるに過ぎないと言って良いだろう。川を理解するためのねばり強い現地調査の中で水工学の特長を最大限に生かすという意図と工夫が求められる。

2. 河道計画の新たな目標とその枠組みについて

2. 1 河道計画が目指すべきもの

河道は、大きく見ると水循環系を構成する要素の 1 つである。河道計画の目標は、水循環系と人とかかわりの中で水循環系がどうあるべきかという大きな枠組みから考えるのが良い。NIRA（総合研究開発機構）に設けられた水研究委員会では、水循環系のあり方について、表-1 のような提言をしている^り。表に示された 2 つの大目標に河道計画から貢献するという観点でこれらを見ると、特に項目 I ②と II ①が重要であり、ついで I ③と I ④を強く意識する必要がある。すなわち、人間系の活動に

表-1 水循環系づくりにおける基本的な価値観についての提言（NIRA 研究会による）

基本的な価値観	実現のための 5 条件
I. (人間にとって、生物にとって?) 永続的で安定な水循環系をつくろう	①外力（降雨変動）の負荷に対してマイルドに応答する。
	②最大被害がコントロールされ、カタストロフィーが生じない。
	③物質循環が健全である。
	④水循環経路の長期的な維持が容易である。
	⑤水循環系をとりまく環境の変化に対して安定である。
II. 人が水循環系との対話を楽しめる状況をつくろう	①水循環系が、自律した（生きている）系である。
	②知的・情感的対話ができる。
	③他所にない固有の持ち味、意味がある。
	④人が快適感を持てる。
	⑤人と水循環系との間に多様な反応経路がある。

大きな支障が出ないように河道をコントロールする一方で、川が本来持つ自律的な動態（1 章で述べた川らしさ、川の本質）を最大限生かすことを、河道計画の目標とし、この際に、河道を通した物質循環の健全性と河道の長期的な維持について充分考慮して行こうということになる。

これら 2 つの目標（上記太字）のうち前者については、被害発生頻度の制御（図-1 の曲線 I から II へ）ではなく、外力～被害関係の制御（図-1 の曲線 I あるいは II から III へ）という視点が重要である。河川に作用する外力は自然の力によるものであり、その規模を予め限定して考えることは適切でない。また、被害防除のための施設に完全性を求めることも合理的とは言えない。したがって、被害発生の可能性を幅広く考えた上で、外力規模と被害程度との関係を人間系が許容できるレベルまでコントロールする手だてを講じることが重要であり、これを河道計画の中にも組み入れる方策・技術が求められる。後者の目標については、「川が本来持つ自律的な動態」「川らしさ」の具体的な中身を特定し、河道計画を通してそれを確保する方途を見出すことが求められる。

さて、これら 2 つの目標の追求が、河道への相反

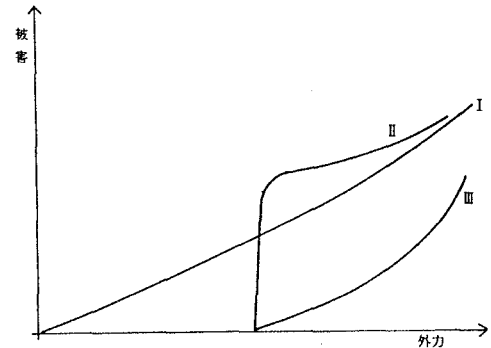


図-1 外力～被害関係をどう制御すべきか

する働きかけを生むことがままある。河川事業への批判の多くもそこに向けられていた。この問題を解決するため、まず、2つの目標の追求が極力相利的せめて中立的な関係を生むような河道計画手法を考える必要がある。その際には、被害頻度（起こる一起こらない）のコントロールでなく被害程度（起こり方）のコントロールが重要であるという点を最大限に考慮して、受容できる被害程度（正確には、被害と呼ぶ必要が無い河道・構造物の変形）と許容できない被害程度を区分けし、前者の許容が川の自律性確保に寄与するような手だてを考えることが大事である。また、川の自律性（川らしさ）確保が後者発生の防止にも生きるような、またはその逆の仕組みを工夫することが大事である。

しかし、そのような努力（人間系と自然系の共生の追求）にも限界がある場合が多く、最終的な局面では、程度の差こそあれ、2つの目標の追求による衝突（人間系と自然系との対立）が生じるはずである。したがって、この衝突をどこで・どう回避するかを定める適切な手だてが河道計画に準備されていなければならない。これからの河道計画には、1)人間系の都合を反映させる手だて（従来からあった；ただし、外力～被害関係制御へ移行）、2)自然系の都合を反映させる（川らしさ、川の自律性を発揮させる）手だて、3)人間系と自然系との共生をはかる手だて、4)それが充分実行されてもお残る両者の対立点について合意形成をはかる手だて、の4つが、対象とする河川の状況に応じて上手にバランスよく実行されるような形で具備されていなければならないと考える。

2. 2 河道計画の新たな枠組み

以上のような目標を河道計画に掲げた場合、その原案づくりの枠組みについて、図-2 に試案を提示し、本稿の議論を深めるためのたたき台とする。この枠組みの特徴は、前節であげた2つの目標を明文化して組み込み、それらに関する評価を河道変化に基づき行おうとしていることである。また、河道計画策定の中に、維持管理方針の策定や、河道状況のモニタリングを最初から組み込んでいることである。さらに、当初の基本方針通りの目標が達成されない場合、その目標自体を見直すプロセスを入れており、ここでは、前節で述べた対立点についての合意形成過程が組み込まれることになる。

仮に、図-2 のような骨格で河道計画原案の策定を進めるとしたとき、我々はどのような情報を新たに必要とし、そのためにどのような技術が求められるであろうか？ このことを次章以降で考えてみたい。

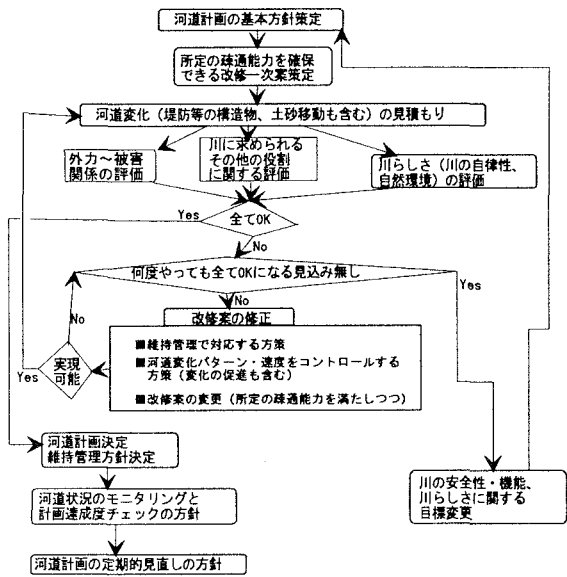


図-2 河道計画原案づくりの枠組みについての試案

3. 河道変化を視軸にした技術課題の整理

3. 1 「河道変化」という着眼点の重要性

河道は本来「変化」するものである。これまでの河道計画、河川改修にあつては、上記のような「河道の変化」は必ずしも正面からは取上げられてこなかった。これは、河道計画、河川改修にこのような「変化」を取込むための予測手法が充分でなかったこと、河道の変化率が小さいと考えられていたこと、早期に治水安全度を向上させることが望まれていたことによる。しかし、2章で述べたような河道計画においては、「河

道の変化」を当然のこととし、「河道変化」を幅広くとらえ、「河道変化」を様々な価値論と結びつけ、このような「変化」と共存する、あるいは取込んだ方が検討されなければならない。河道計画において「変化」を前提にすることの意義は次のようである。

- ①長期にわたる河道維持を自動的に考えることになる。管理・更新を自動的に組込むことになる。
- ②河道の実態と計画の前提とのずれが小さくなり、河道計画の合理性、わかりやすさが増す。
- ③変化・変動は川の息吹であり、変動を許容することは、川本来のあり方、川らしさ、健康な川の追求と同じ方向性にある。また、変動をある程度許容することで無理な河川構造物設置の必要性が減り、構造物計画の経済性、合理性が増す。
- ④河道の特性、河道をとりまく状況変化の影響は河道の変化、変動にはっきり現れることから、それらを自動的に考慮することになり、川毎、区間毎に異なる特長を持つ整備方針が生れる。
- ⑤変化・変動の原因のコントロールを考えるようになる。

3. 2 河道変化の実態とその河道計画上のとらえ方

3. 2. 1 諸作用に対する日本の沖積地河道の応答特性を調べる意義

日本においては産業活動の主要部分が沖積平野で行われてきたため、古来より沖積河川は様々な人為的作用を受けてきた。ことに、1950年代以降に本格化した洪水防御、水資源開発、河道改修のためのプロジェクトは、沖積河川自体を大きく変貌させるとともに、沖積河道の形成条件をも大きく変化させた。そうした変化の度合いは、日本における沖積平野での人間活動が非常に高密度であるために、諸外国に比較して際立って高いものになっている。こうした人為的作用に対する河道の応答特性を知ることは、水系に及ぼす人為的作用の今後のあり方、河道計画を長期的視点から考える上で非常に重要である。また、この応答特性は、自然条件の変化に対する河道の起こり得る応答を推定する上でも有用な情報となる。ここでは、

表-2に示した河川を検討対象に、主として1950年代以降の大規模な人為的諸作用に対する日本の沖積河道の応答特性を調べ、その要因を分析し、引続いて起こり得る応答がもたらすであろう諸問題について考察した結果を要約する。詳細は文献2)~4)を参照されたい。

3. 2. 2 河道への人為的作用

分合流を繰返して流下していた河道の統合・分離、河道法線移動のための新しい河道の開削（放水路を含む）、蛇行区間の短絡（ショート・カット）から成る河道の基本的骨格の主な変更は17世紀からはじまり、19世紀後半から本格化し、1950年代までには概ね完了した。20世紀初めまでに主要河川における連続堤がほぼ完成し、その後は堤防のかさ上げと強化が行われている。これらの過程で、河道法線の大きな変更は河岸侵食対策工などによって許されなくなった。以下に示す1950年代以降の大規模な人為的諸作用は、このような状況の下で生じた。

①低水路の掘削・拡幅：全国的には高度成長期（1950年代から1970年代はじめ）をピークとして、大都市部に近い河川ではもっと早くから、疎通能力増大と建設用骨材としての

表-2 検討対象河川

No.	河川名	No.	河川名
1	名取川	15	黒部川
2	利根川	16	雄物川
3	信濃川	17	札内川
4	淀・木津	18	渡良瀬川
5	太田川	19	川内川
6	紀ノ川	20	重信川
7	高梁川		
8	仁淀川		
9	那賀川		
10	木曾川		
11	矢作川		
12	斐伊川		
13	筑後川		
14	石狩川		

ダム流域率・[%]

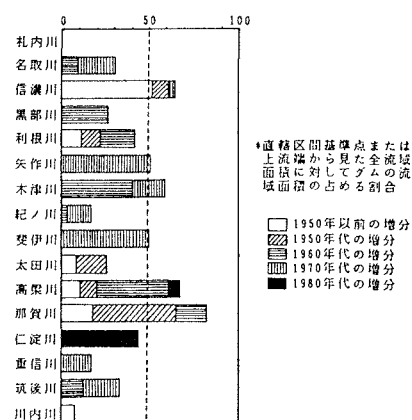


図-3 ダム流域率の経年変化

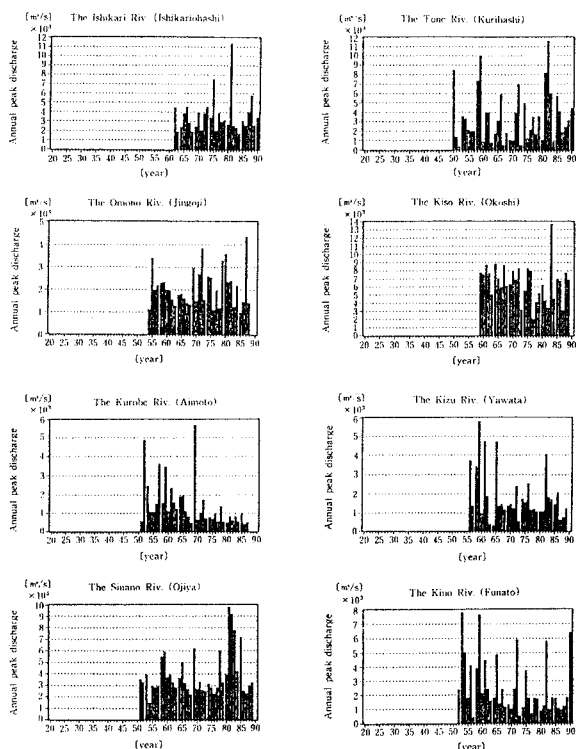


図-4 年最大流量の経年変化

河床材料の利用という2つ目的から、砂利・砂の採取が行われた。その後採取量は減少傾向に転じ現在に至っているが、疎通能力増大を主目的とした低水路の掘削・拡張は着実に進められている。

②上流境界条件の変化その1<土砂供給>：図-3は、検討対象河川の沖積平野に位置する区間の上流端から見た流域面積に占める高いダムの流域面積の割合である。以後、この割合をダム流域面積占有率と呼ぶ。ここで高いダムは、洪水時に掃流砂量と浮遊砂量をほとんど通過させずその上流にほぼすべて堆積させるだけの堤高を持ったダムと定義している。この図は、かなりの河川でダム流域面積占有率が50%を上回っていること、また、この占有率の増加が主に1950年代から1970年代にかけて現れていることを教えている。ダム流域面積占有率の増加に対応して、また、土砂災害防除のための砂防事業進捗も一因となって、日本の多くの河川で、主に1950～1970年代にかけて沖積河道への土砂供給の減少が始まり今日に至っていると考えられる。

③上流境界条件の変化その2<洪水流量>：図-4は、検討対象河川に発生した平均年最大流量の経年変化を示している。この図から、平均年最大流量が大きく変動すること（木曽川を除く）、洪水が現れる頻度に経年的変化が見られない河川と、その頻度が不連続的に変化する河川があることがわかる。後者の例が黒部川、木津川、紀の川であり、ある時期から洪水頻度が小さくなっている。

日本の河川の場合、ダム貯水池が流量を若干低減させることはできても、洪水発生頻度を大きく変えるだけの規模を持っていないことから、この頻度の変化は降水特性の経年変化に主因があると著者は推定している。一定期間の洪水の非発生は、河川地形を分析する際に考慮すべき現象である。

大陸性の単純な地形に大規模なダム貯水池が本川に造られることが珍しくない諸外国の事例に比べ、日本のダムの規模は小さく、流

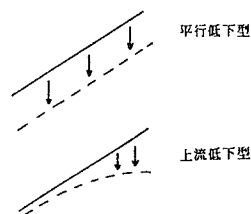


図-5 2つの河床低下パターン

域内の様々な場所に様々なダムがあることが多いので、ダムが流況変化や土砂供給変化を通して河道に与える影響に関しては、一律的な見方をするのは難しく、個々の事例ごとにきめ細かい分析を行うことが必要である。

3. 2. 3 河道の応答特性（生じた河道変化パターン）

（1）河道縦断形

①河床低下

ほとんどの河川のほとんどの区間で河床低下が起こっている。河床低下に伴う河道縦断形の変化は2つのパターンに分類できる。1つは、河床がほぼ平行に低下していくものであり、これを以後平行型河床低下と呼ぶ。残りは河床が上流から低下していくものであり、以後上流型河床低下と呼ぶ。図-5に両パターンが例示されている。表-3には、それぞれの河道変化パターンがどの河道セグメント分類（定義は文献 3）、5)を参照）に生じたかを示したものである。表からわかるように、調査対象河川の中では、セグメント 1、セグメント 2-1、セグメント 2-2 区間のほとんどで平行型河床低下が発生し、一部のセグメント 2-2 区間で上流型河床低下が起こっている。上流型河床低下が起こっている川は、もともと砂を豊富に供給する流域を持ち、セグメント 2-2 区間だけから成っている。

表-3 河道セグメント分類ごとの各河道変化パターン発生状況

河道変化パターン		河道セグメント分類			
		1	2-1	2-2	3
縦断形変化	上流型河床低下	0	0	3	0
	平行型河床低下	6	5	8	0
	河床不動点の出現	0	0	1	0
横断形変化	タイプⅠまたはタイプⅡ：低水路幅縮小、低水路における高水敷化、植生帯形成	0	2	3	0
	タイプⅢ：礫床河道における植生帯の形成	1	2		
	タイプⅢ'：礫床－網状流路における低水路の形成と植生帯の形成	2			
検討対象河川（表-2）の各セグメント総数		7	10	13	4

②セグメント3区間の伸長と河床上昇

河口付近の河道の掘削によってセグメント3の区間長が増大している河川がかなり見られた。また、セグメント3区間においては、潜在的に河床上昇傾向が見られることがわかった。セグメント3以外では河床上昇傾向は見られなかった。

③河床不動点の出現

平行型河床低下が生じているセグメント2－2区間の中で、一部だけ河床が低下せず上下流に比べて相対的に高くなる現象が見られた。

④河床勾配増大に対する不応答

連続的なショートカットの開削によって河床勾配が増大した後、河床縦断形がどのように変化したかを追跡した。石狩川では、河口から85 km地点から120 km地点にかけて、主に1940～1950年代に開削が行われ、この区間の河床勾配がおおよそ1/2600から1/1300と2倍に増えた。川内川では、河口から67 km地点～76 km地点にかけて、1950～1960年代におおよそ1/3200～1/1750とやはり2倍近くに河床勾配勾配が増大した。河床勾配が増大すれば流砂量が上下流区間に比べ増大し、河床勾配増大区間において上流型河床低下が発生すると予想される。しかし、河床勾配改変以降、石狩川の区間で起こったのは平行型河床低下であり、川内川の区間の縦断形には大きな変化が起きなかった。これらのことは、人為的河床勾配増大に対して両区間とも明確な応答を示さなかったことを意味している。

（2）河道横断形

図-6に代表的な横断形変化パターンを示す。

①タイプⅠ：低水路川幅縮小

このタイプは、礫床河川において河床の一部に堆積が生じることによる川幅縮小であり、堆積する場所以外の河床では有意な変動がほとんど見られない。形成された高水敷には植生が繁茂している。このタイプは、

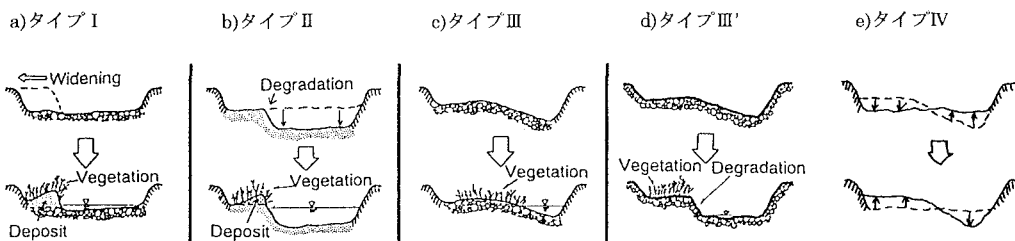


図-6 河道横断形状の応答変化パターン

セグメント 2-1 で観察され（セグメント 2-2 でも起こる可能性がある）、低水路川幅の拡大に対する応答として現れる。

②タイプⅡ：低水路の一部高水敷化

このタイプは、セグメント 2-2（したがって砂床河川）において、河床の一部が低下し、低下しないで残った部分に堆積が生じ、そこが新しい高水敷となることにより川幅縮小が起こるというものである。このタイプの新高水敷も植生を持つ。この河道変化は、低水路河床における一部幅の低下に対する応答として起こる。

③タイプⅢ：礫床河道における植生帯の形成／タイプⅢ'：礫床－網状流路における低水路の形成と植生帯の形成

このタイプは、礫床河川において、有意な河床変化を伴わず河床の一部が植生で覆われることにより、外見上川幅が小さくなったように見えるタイプである。セグメント 2-1 区間では、交互砂州上の比高の大きい部分から植生繁茂領域が発生・拡大し、小規模洪水によっては容易に破壊されない規模にまで発達する変化がいくつか見られた。このような変化が連続的に生じている区間を上空から見ると、低水路の両側に形成された植生の帯によって、その川幅が縮小したように見える。タイプⅠの場合と異なり、植生繁茂領域での河床地形変化は今のところ顕著でない。このタイプは、那賀川、重信川で確認された。

なお、セグメント 1 区間において、有意な堆積は伴わないが、河床の一部が低下し、低下せずに残った部分に植生が繁茂するというタイプもあり、ここではこれをタイプⅢの亜種としてⅢ'と分類する。セグメント 1 区間は一般に網状の河床形態を持つため、そこにははっきりした低水路がないことが通常である。黒部川、重信川、札内川のセグメント 1 区間において、新たに明確な低水路が形成され、相対的に高くなった元の河床部分に植生が繁茂するという変化が起こっていることがわかった。タイプⅡの場合と異なり、植生繁茂領域での河床地形変化は今のところ顕著でない（ただし 0 ではない：この重要性は 3.3.1 参照）。

④タイプⅣ：河床平坦化後の砂州の再形成

このタイプは、平坦化された河床に再び砂州が形成されるという応答である（表-3 では取り上げていない）。セグメント 2-2 あるいは 3 の砂床区間で観察される（セグメント 2-1 でも起こりうるが、応答速度が遅いと予想される）。阿賀野川、利根川の下流部でこの事例がある。

3. 2. 4 河道応答のメカニズムについて

前述の河道変化に寄与した可能性のある要因を挙げると、次の a)～h)である。a) 土砂供給の減少：b)無洪水期間の出現（洪水発生が無い期間がしばらく続くこと）：c)河道掘削：d)地盤沈下：e)mobility の低い河床の露出：f) armoring による表層河床材料の固定化：g)浮遊砂（主にウォッシュロード起源）の河岸への堆積：h)水位の大きな変動。

これらの要因のうち a)～d)は外的な独立した要因であり、e)～g)は、a)～d)により触発されて顕在化する内在的要因である。また、a)c)d)は人為的な、b)は主に自然的な要因である。h)は、河口部を除いて日本の

河川が元々持っている要因である。以下に、各支配要因と応答特性との関連について考察する。

①河床低下と河床上昇

a)c)dが河床低下の要因になりうる。平行型河床低下が生じた河道の河床低下が河道掘削の量（地盤沈下が無視できない場所ではその量をさらに加えたもの）にほぼ対応することから、平行型河床低下は要因 c)d) によるものが大きいと判断できる。また、要因 a)が上流型河床低下を起す性質を持ち、要因 c)d)は、調査対象河川の場合平行型河床低下を起こすように作用していた。したがって、上流型河床低下は要因 a)により生じたと判断できる。実際、上流型河床低下が生じた河川は砂を豊富に供給する流域を持ち、その流域では土砂供給の減少に結びつく作用があった。

図-3 に示したように土砂供給が減少し始めていると推定される河川の割合がかなり多いにもかかわらず、上流型河床低下を起こしている河道が少ない（表-3 参照）。特に、土砂生産源に一番近いセグメント 1、2-1 区間においてこの型の河床低下が見られない。以下の2つがこの理由である可能性がある。1つは、土砂供給減少の影響が沖積河道まで及んでいないこと、もう1つは、礫河床河川では砂床河川に比べて土砂流送が不活発である上に **armorings** の効果が重なるため、河床低下速度が極めて小さいことである。これらのどちらの理由が支配的かを判断する材料はまだ充分には集められていない。もし、第2の理由が支配的な河川があるとなれば、礫床区間の直下流に接続する砂床区間（セグメント 2-2）においていずれ上流型河床低下が明確になることが起こり得る。

セグメント 2 区間からセグメント 3 区間への接続点において、掃流力がかなり小さくなるにもかかわらず、河床材料の変化がセグメント 1 あるいは 2-1 から 2-2 へのそれ（礫から砂へ）ほど大きくないこと、silt や clay などの細粒分がセグメント 3 区間で沈降・堆積する場合があることから、セグメント 3 区間は本来的に河床上昇の傾向を持つ。

以上については、文献 4)、6)、7)で詳細に分析されているので必要に応じ参照されたい。

②河床不動点の出現 & 河床勾配増大に対する不応答

セグメント 2-2 区間における河床低下によって、砂から成る現在の河床材料よりも **mobility** のはるかに低い堆積層が一部区間で露出したこと（要因 e)）が、河床不動点出現の直接的原因である。間接的原因は、日本の沖積平野が 5000 年程度の間の狭い空間における沖積作用により形成されたものであるため、河床から比較的近い所に粘着性材料など侵食されにくい層が埋没されている場合が多いことである。河道法線の人為的移動により、**mobility** の非常に低い材料を河床に持った区間がところどころにあることも間接的原因の1つである。今後セグメント 2-2 区間の河床低下がさらに進行すれば、河床不動点出現箇所が増大すると推定される。なお、礫床河川（セグメント 1、2-1）においても同様に現河床と異なる材料からなる層が露出する状況が起こっているが、元の河床材料との **mobility** の差が砂床河川ほど大きくないので、河床形状への影響は明瞭でない（しかし影響は無視できないと考えられる）。

河床勾配増加後河床の **mobility** が低下し、このことが人為的河床勾配増大による上流型河床低下を防いだ可能性がある。この可能性を評価するには、さらに多くの情報が必要である。

③タイプⅢ、タイプⅢ'の応答

タイプⅢ'に関しては、要因 c)により人為的に低水路が造られ（それ以外の要因による河床低下でもよい）、その後要因 b)により大きな営力が作用せず現在に至ったというシナリオが有力である。ただし最近の研究によると、程々の規模の洪水による高水敷的河床への細粒土砂運搬・堆積が、そこでの密な植生繁茂に不可欠であることが指摘されている。これについては文献 8)9)に詳しい（3.3.1 でも触れる）。

タイプⅢが起こるためには、洪水によって植生が流されないメカニズムが必要となる。以下の2つがそのメカニズムである可能性がある。第一は、要因 a)により要因 f)が引き起こされ、その結果河床材料が動かなくなったために、植生が洪水により流されなくなったというものである。植生が立つ基礎である河床材料が活発に動けば、植生自体が洪水流の力に対抗できても、簡単に流されてしまう。なお礫床表面（根圏領域）

のマトリクス（礫の間の細かい材料成分）に含まれる細粒土砂（シルト粒径以下）の混入が早い植生発達に重要という指摘がある（文献 10）参照）。また、礫床表面が動きにくくなったことがダムと直接的な関係があるかどうかについては、さらに実証的分析を必要とする（さらに“動きにくくなった”ことが全国的傾向かどうかについても、明確な実証データは少ない）。第2は、要因 b)によって、無洪水期間中に、1回の洪水ではすべて破壊されない規模にまで植生が繁茂するというものである。

この事例が文献(17)で調べられている。これら2つのメカニズムとも、植生繁茂のために要因 h)を必要とするが、セグメント 1、2-1 では元々存在する。

④タイプⅠとタイプⅡ

タイプⅠの引き金は、要因 c)による低水路幅の増大である。幅が増加すると、河口近く以外の区間で一般的に存在する要因 h)によって、平水時に河床の一部が露出するようになる。露出する部分は主として洪水時に形成された砂州の高い部分である。ここに植生が繁茂すると、洪水時に植生繁茂領域の内外で大きな流速差が生じ、かつ植生繁茂領域での河床せん断力が非常に小さくなるため、植生領域において浮遊砂（特にウォッシュロード成分）の堆積が活発に起こる（要因 g)）。植生繁茂と堆積が互いを促進し合うため、新しい高水敷が活発に形成される。

タイプⅡの引き金は、低水路における部分的河床低下によって横断方向に段差が生じることである。段差の発生は、その（段差）両側での流速差を大きくするので、段差近くの上段河床への浮遊砂の堆積が活発になる（要因 g)）。このことが、初期の段差さらに大きくさせ、新たな高水敷の発達につながる。要因 h)により水面から露出した上段河床に植生が繁茂することも、その土砂堆積を活発にする（この方が支配的な場合も多い）。

これらのメカニズムについては、文献 11)と文献 12)（第6編）で詳細に分析されている。

⑤まとめ

今まで議論した応答メカニズムをまとめて図-7に示す。

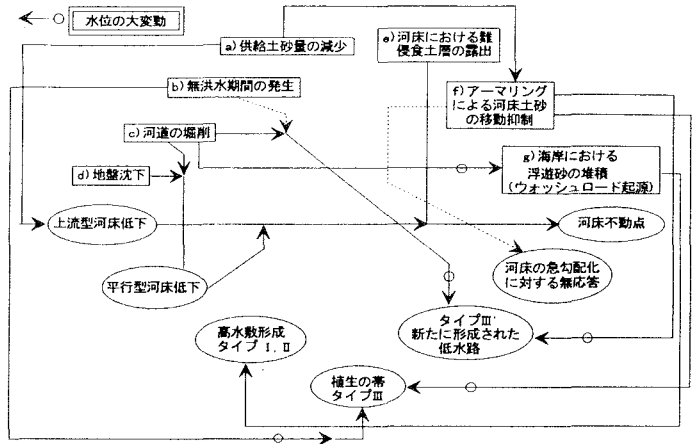


図-7 各河道変化パターンの要因相関図

3. 2. 5 河道計画という観点からの河道変化のとらえ方(1)―「河道変化速度」の重要性―

以下の3.2.5、3.2.6の2項では、今まで取り上げてきた種々の河道変化パターンを河道計画の観点からどう取り扱うか、すなわち図-2の中核部分をいかに具体化するかについて考える。本項では、まず、河道変化がもたらす河道計画上の課題を整理し、それに基づいて河道計画に河道変化を組み込むより基本的な考え方について考察する。次いで、河道変化を河道計画に反映させる上で、河道変化速度の見積もりが重要であることを示す。

(1) 河道変化パターンと河道計画上の課題との関連づけ

以下に、河道計画上考慮すべき河道変化パターンとそれがもたらす課題を示す。とりあげた河道変化パターンは河道縦断形の長期変化、河道縦断形の洪水中の変化、河道横断形の長期変化の3つに大きく分類される。

①河道縦断形長期変化

河道縦断形の長期変化は、そのことがすぐに治水上の危険につながるものではなく維持・管理で対応可能な変化である。河床の低下を起こす縦断形変化は護岸、橋脚等の河道内構造物の維持・管理、分流点・遊水池等流量コントロールを行う地点の機能維持にとって重要な問題である。一方河床の上昇を起こす縦断形変化は疎通能力維持の労力を大きくする。

課題－１：砂利河道（セグメント１，２－１）の長期的河床変化

流域状況の変化から今後供給土砂量の減少が予測される河川が増えており、これに伴うセグメント上流での河床低下が考えられる。一方勾配が急減するセグメント下流端では河床上昇が考えられる。これらの変化は橋脚、護岸等の構造物維持と疎通能力確保の面で懸念される。また、砂利河道では砂河道には少ないと考えられるアーミング現象があり、この現象が河床の低下量を減少させる、または低下速度を遅くする等の効果が期待される。河床の上昇、低下それぞれの最終的な量と変化速度を予測し、これを踏まえた河床高縦断形の設定あるいは河道管理のあり方を考える必要がある。

課題－２：砂河道（セグメント２－２）の長期的河床変化

課題－１と同様、今後供給土砂量の減少が予測され、これに伴う河床縦断形変化、セグメント上流での河床低下が予想される。砂河川は河床材料の移動が砂利河川に比べて非常に速くアーミング現象もあり期待できないので縦断形の変化が早期に現れることが予想され、変化速度が速い場合には河道管理上苦勞することも懸念される。また、砂河川では河床下に難侵食層がある場合も多く、これら難侵食層が床止めの役割を果し河床の低下を防止することが期待される。砂河川の河床変化速度と最終縦断形を予測し、河床高の設定、河床の管理のあり方を考える必要がある。

課題－３：セグメント３（デルタ河道）と２－２との接合点における長期的な河床変化

デルタ河道は一般的に土砂の堆積空間であり、特にセグメント２－２との接合点では掃流力の急減により堆積が起こりやすい。したがってこの区間では疎通能力の長期的な確保が問題となる。セグメント２－２との接合点における堆積速度を予測し、この堆積を河道計画、河道管理上へ反映する方法について検討する必要がある。

②河道縦断形洪水中変化

洪水中に起こる河道変化によって発生する問題は河道の維持、管理では防ぐことができないものであり、その危険を予測しておき河道計画の中で対処法を考えておくことが重要である。特に洪水中の河床上昇によって疎通能力不足が生じた場合には破堤の危険が増すので注意を要する変化である。

課題－４：砂利河道（セグメント１，２－１）と砂河道（セグメント２－２）との接合点における洪水中の河床変化

砂利河道下流端の勾配変化区間は掃流力の急減区間であるため洪水時に河床が上昇することが考えられる。この河床上昇量を考慮せずに河道計画を立案することは、疎通能力の過小評価につながる可能性がある。この河床上昇量は洪水規模が大きいほど大きくなると考えられる。砂利河道下流端での計画洪水時の河床上昇量を評価し、この河床上昇を河道計画、河道管理へ反映する手法について検討する必要がある。

課題－５：セグメント３（デルタ河道）と２－２との接合点における洪水中の河床変化

デルタ河道上流の勾配変化点では砂利河道下流と同様の理由により洪水中に河床が上昇することが考えられる。この河床上昇量を評価し、河道計画、河道管理での取扱いについて検討することが必要である。また、河口部では大洪水時に低下背水が生じるため、逆に河床が低下することが推定される。これに伴って増加する河積を考慮することにより計画水位を合理的かつ経済的にできる可能性がある。河口部の河床低下量を予測し、河道計画、河道管理への反映について考える必要がある。

③河道横断形長期変化

河道横断形の安定性は、河道維持、管理の労力に直結する。長期的に安定な横断形を設計すれば河道の維

持、管理労力は非常に少なくすむ。逆に維持、管理を必要とする横断形の変化が頻繁に起こるようであれば、河道管理のあり方が重要となる。

課題－6：セグメント2－1、2－2河道における低水路一部高水敷化、川幅縮小（タイプⅠ、Ⅱ）

河道の拡幅を行った場合、低水路の高水敷化現象が起こり川幅が元の幅に縮小していく現象が条件によっては見られる。この縮小が疎通能力確保に支障をきたすものであれば掘削による川幅維持が必要となる。この維持労力は川幅縮小速度によって決まる。川幅縮小の有無とその速度を予測し、河道計画、河道管理への反映について検討する必要がある。

課題－7：砂利河道（セグメント1、2－1）における植生帯の形成（タイプⅢ、Ⅲ'）

砂利河道では、河床であったところに植生が繁茂する場合がある。このような植生の繁茂は河道の疎通能力の低下をもたらすことが懸念される。また、以前砂州であった場所での植生の繁茂は砂州水衝部への流水の集中を助長し、水衝部の河岸、堤防危険度を増大させることが懸念される。さらに、礫床河道の多くが密生した植物に覆われる状況（樹林化）は大きな環境変化となり、河川の自然環境保全の観点からも、植生動態は重要である¹³⁾。これら植生の繁茂による疎通能力への影響、流況変化特性、自然環境への影響を把握し、河道計画における植生帯形成の取扱い、植生管理のあり方について検討する必要がある。

課題－8：セグメント1における河道複断面化（タイプⅢ'）

近年、セグメント1の河道において河床掘削によりあたかも低水路のような部分が形成されつつある場合がある。このような河道状況を踏まえて計画的に複断面化を図ろうとする例も見られる。セグメント1は河床勾配が急で洪水時の外力が大きい河道であり、もともと単断面河道である。このような性質を持つ河道で複断面河道の維持可能性、複断面河道にしたことによる流況、土砂流送への影響は河道の維持管理にとって重要な問題である。複断面河道における土砂流送能力、低水河岸の侵食、高水敷上の侵食、疎通能力等の検討を行いセグメント1の複断面化の河道計画への反映について検討する必要がある。

（2）河道変化を河道計画に組み込む考え方について

河道変化への対応についての一般的な考え方を以下に提案する。

- ◆河道は水と土砂、植生の相互作用で形成されているため、条件が整えば比較的容易に変化し、その変化量が河道計画・河道管理上無視できない量に達する場合がある。変化自体が川らしさの本質でもある。したがって、河道計画および管理計画策定にあたっては、現況河道あるいは改修後の河道が変化するかどうか、変化する場合にはその特性（変化速度と量など）を予測し、それを充分考慮しなければならない。
- ◆河道の変化に対応するには、①河道変化を抑制する／②河道変化を許容する／③河道変化の一部分を抑制し残りを許容する、という3つの考え方がある。ここでいう「許容」とは、河道変化を前提にした河道計画策定、河道管理を行うことである。具体的な対応法を決定する際には、上記①～③それぞれの考え方に合う代替案を広く検討して、河道変化を許容した場合の影響度、河道変化抑制の難易度とそれを実施した場合の影響度を総合的に勘案し、また方法選択の判断基準として特に以下の点を重視するものとする。
 - ・短期的（河道改修労力自体にかかわる）経済性だけでなく、改修後の河道維持、管理労力を含めた長期的経済性の観点から見て妥当な方法であること。
 - ・当該区間の川本来の魅力を阻害せず、またそこで期待される洪水処理以外の幅広い役割を尊重した方法であること。
 - ・対症療法に頼らず、当該河道区間の河道特性に適い、対象とする河道変化の原因制御を中心にした方法であること。
- ◆河道変化予測技術には改良すべき点を多く残している。しかし、予測技術の完成を待って対応を考えていたのでは遅いので、現段階で得られる情報をもとに考慮すべき河道変化パターンと取るべき対応を決めておく。同時に、河道変化状況について継続的な監視を行い、監視結果の集積と予測技術の発展に応じて、河道変化への対応法を随時改良して行くものとする。

以上の考え方に従い、(1)に述べた課題への対応を具体事例を基に検討した結果が文献(4)に述べられているので必要に応じ参照されたい。

（3）河道変化速度の見積もりの重要性⁷⁾

ここでは、上述の河道縦断形長期変化への対応を取り上げながら、河道計画への河道変化組み込みを図る上で「河道変化速度の見積もり」が重要なことを示す。沖積河川には一般に安定な縦断形は存在しない。沖積河道縦断形に関する河道計画・設計・管理の本質は、縦断形の変化速度を考慮し必要に応じ適切な対策を講じることにある。種々の要因で起こる（起こり得る）縦断形変化の速度と時間スケールを見積もり、各変

化要因の重要度の軽重を判断し、縦断形予測目標や対策の優先順位を大局的に見て誤りなく設定することは、実務上の観点から非常に大事である。

代表的な縦断形形成として、図-8に示す河道、すなわち G セグメント[河床材料代表粒径 $d_{rs} \geq 15\text{mm}$ 、河床勾配 $I_{bs} \geq 1/1500$]の下流に S セグメント [$d_{rs} \leq 1\text{mm}$ 、 $I_{bs} \leq 1/2000$]が接続し、さらに下流に勾配が水平に近い砂床セグメント (河口 S セグメント) が

接続する河道を取り上げる。G-S セグメントの境界では河床勾配と河床材料が急変することになる。大きな沖積平野を持つ河川のほとんどはこのような特徴を持つ。なお、G セグメントはセグメント 1 または 2-1 に、S セグメントはセグメント 2-2 に、河口 S セグメントはセグメント 3 に対応する。

代表的な条件の下で、種々の要因に対する G、S 各セグメントの大局的な変化速度、具体的には河床上昇・低下速度を見積もった。まず、流量と供給土砂量、海水位が一定の条件での変化速度を変化速度①とおく。河川改修により築堤が行なわれると、地形学的には土砂の堤防外への流出が無くなるので、両セグメントの上昇速度がこの分増加する。この時の変化速度を③とおく。さらに、この条件の下で供給土砂が大きく減少すると河床低下が起り得る。この低下速度を④とおく。このほか、地殻変動、地盤沈下による変化速度をそれぞれ②、⑤とする。詳細は文献(7)を参照されたい。

得られた各変化速度の見積り結果を図-9に示す。変化がセグメント全体にわたらない場合には、最も変化速度の大きな場所の値を採用している。見積りの精度と条件の不確定さ、変化速度の経年変化を考慮して、変化速度には幅を持たせてある。この図から以下のことがわかる。1)①の速度は G、S セグメントとも 1mm/年のオーダーで大きな差はない。2)②の速度よりも①の速度の方が 1 オーダー大きい。3)③の速度は、G、S セグメントとも①の速度より 1 オーダー大きい 10~20mm/年程度となる(河道維持作業が全く行われない場合)。4)土砂供給の停止による各セグメント上流端での河床低下速度④の最大値は、S よりも G セグメントの方が 1 オーダー小さい。これは、砂利の流送量が元々少ないことと、砂利にはアーミング効果があることによる。

以上のモデル沖積河道が持つ擾乱に対する縦断形の応答特性を、縦断形変化の河川工学的取り扱いという観点から論じると次のようになる。まず、地殻変動の影響は沖積作用に比べると小さく、工学的には沖積作用のみに着目すればよいと言えそうである。これに対し地盤沈下は、縦断形に大きな影響を与え得る。築堤により土砂の堆積幅を狭めることにより、河床上昇速度が定常状態から 1 オーダー増加するが、この速度は最盛期の河床掘削速度(河床掘削能力の 1 指標とも言える；最大 10^2mm/年 のオーダー)と比較するとなお 1 オーダー小さく、大洪水などによる突発的な大規模土砂流出などを除けば、長期的な河床維持の大きな障害になることはなさそうである。一方、砂供給が減少した場合の S セグメント上流区間の河床低下速度は、

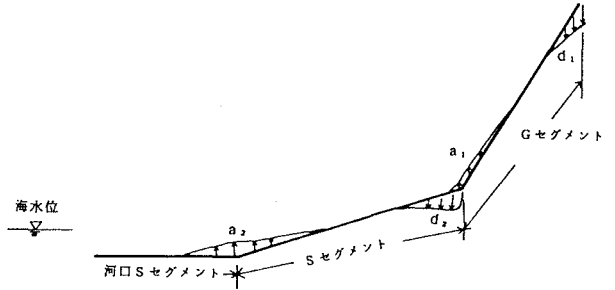


図-8 河道変化速度見積もりの対象とした河道

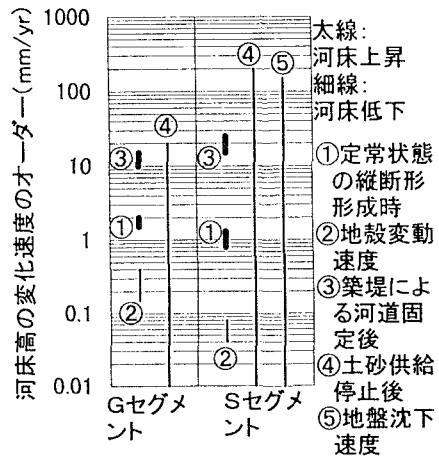


図-9 モデル沖積河川の要因別縦断形変化速度のオーダー見積もり

河道維持管理上重要な課題につながるだけの大きさを持ち得る。これに対し、同じ供給土砂減に対する G セグメントの応答は 1 オーダー鈍く、それがもたらす問題は、縦断形という観点で見ると S セグメントよりも穏やかとも言えそうである。

個々の河川の縦断形変化予測を行なうには、対象河川の変化要因を具体的かつ詳細に考慮しなければならないが、ここで行ったように縦断形変化の大局的な傾向を把握しておくことは、縦断形変化への対応の優先順位を大筋で誤りなく決定する上で大事である。

3. 2. 6 河道計画という観点からの河道変化のとらえ方(2)―「インパクト vs. 応答」という見方の活用
(1) 外的インパクトに対する河道応答の特性分類

3.2.3 で取り上げた河道変化は、外的インパクトに対する河道の応答とみなせる場合も多い。島谷・萱場は¹⁴⁾、中小河川におけるインパクト vs. 応答関係を整理し、この関係を理解しておくことが河川の自然環境の保全を考える上で重要かつ有用であることを提起している。インパクト vs. 応答関係は、規模の大きい沖積河川においても、また、河道計画全般においても重要な見方である。河道変化速度に加え、「インパクト vs. 応答」という見方を導入することにより、河道計画における河道変化の見方がさらに整理される。

3.2.3 に示した河道変化は、表-4 に示すように、①応答時間（応答が完了するまでの時間）、②応答パターン、③インパクトの原因、の3つの観点から特性分類することができる。このうち応答パターンは、多くの場合、図-10(a)に示すように次の3タイプに分類できる。

応答 1)元の状態に戻る：応答 2)インパクトを受けた直後の状態からさらに新しい状態に移行する：応答 3)インパクトを受けた直後の状態を保つ。インパクトの原因については次の3つ、すなわち 1)自然的インパクト、2)人為的インパクト（直接的）、3)人為的インパクト（間接的）、に分類することができる。ここで、直接的とは河道への直接の作用を、間接的とは、流域でのインパクトなど河道への直接の作用でないインパクトを指す。

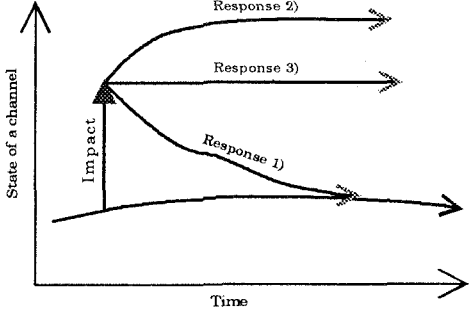
なお、沖積河川の河道変化の場合、時間スケールが異なる複数の変化（応答）が同時進行していることが珍しくなく、1つの<インパクト→応答>が別の時間スケールのより大きい応答の上に乗っている場合も多いと考えられる。この場合、お互いの応答間の相互関係も厳密には無視できない。したがって、「インパクト vs. 応答」の見方は有用であるが、それを現象解釈に機械的に適用するのは避けるべきで

表-4 河道変化についてのインパクト vs. 応答の特性分類

特性分類軸	分類	事例 (3.2.3 に示した河道変化との対応)
応答時間	1 年またはそれ以内	a
	数年	a, b, c
	10～20 年程度	b, c, d, e, f?, g?
	数十年	f?, g?
	100 年以上	h
応答パターン	1)元の状態に戻る	a, b, c
	2)新たな状態に移行する	d, e, f
	3)インパクト作用直後の状態を保持	g
インパクトの原因	自然的 (洪水、濁水など)	a～c
	人為的かつ直接的	e
	人為的かつ間接的	e, f, g

a 砂床河川での平坦化後の砂州再形成
b 礫床河川での平坦化後の砂州再形成
c 川幅拡大後の川幅縮小
d 低水路の一部高水敷化
e 礫床河川の植生帯形成
f 供給土砂減少後の砂床河道河床低下
g 供給土砂減少後の礫床河道河床低下
h 沖積河川のベースの変化

(a)Response patterns



(b)Time series of impact-responses

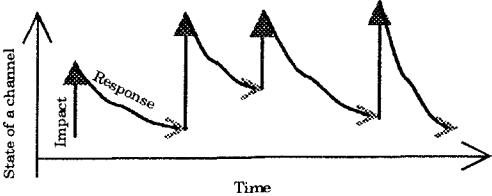


図-10 応答パターンの説明図

あり、現象解明のための検討が併用されることが望ましい。現象解明をしっかり行おうとする局面においては、種々の要因の相互作用を一体としてとらえることが依然として大事である。

(2) 河道計画にインパクト vs. 応答をどう組み込むか

ここでは河道計画の対象として河川の自然環境復元を取り上げ、この観点を中心に、標題を具体的に考えて行きたい。まず、議論をわかりやすくするため、自然環境復元の基本原理を次のように提示する。

考え A：自然のインパクト（多くの場合洪水）とそれに続く河道変化の一連のパターン（図-10(b)）が保全されなければならない。→→→河川の沖積システムの復元

この考え方は、1)自然のインパクトによる河道変化こそが河川固有のハビタットを特徴づける、2)復元は、ある河道状態を再現するのではなく、河川固有のハビタットが拠って立つ沖積システムを再生させることにあり、との考えに基づく。なお、この考え方に基づく復元は、災害防除の目的と相反する関係を持ちうる。

考え B：何とかして、人為的改変（自然環境保全以外の目的）を自然環境保全にとっても良いように変える。この考え方は、人為的作用であっても良い側面を持ちうるとの考えに基づく。ここから、次の2つが出てくる。

考え B-1：人為インパクトによる河川応答の負の効果を、実害が無視できるレベルまで最小化する。→→→環境容量の評価

考え B-2：人為インパクトによる河川応答により、インパクト作用前とは異なるものの、河川ハビタットとしてもう1つ別の良い環境が生まれるように仕向ける。→→→ミティゲーション（持続可能な）

考え B-1 を実践するには、いわゆる環境容量的なものを明確にする必要がある。考え B-2 は幅広く用いられる可能性があるので、その評価基準をどこまで緩めてよいかをしっかりと議論しなければならない。なお、B-2 については、持続可能にすることが大事なポイントになる（後述）。

こうした考えにしたがった自然環境復元を考慮した河道計画において、インパクト vs. レスポンスをどう反映させるかについて、3.2.3 で取り上げた河道変化パターンを例に考察する。

1) 考え A（河川沖積システムの復元）にしたがった場合

低水路河道の川幅拡大は、疎通能力増大の手段としてよく用いられる。拡幅の度合いが、洪水時にも河床材料の動きを不活発にさせるほどの場合、洪水による河道の応答は起こらなくなる。結果として、自然のインパクト（多くの場合洪水）とそれに続く河道変化の一連のパターン（図-10(b)）はなくなり、一方向的変化だけが卓越する。多くの場合、植生繁茂域が拡大し、砂州再形成が起こらなくなるであろう。植生域の拡大は、インパクト vs. レスポンスの連続に依存する河川固有のハビタットを保全するという観点からは、必ずしも望ましいことではない。こうした事態を避けるには、河床材料の mobility 確保を河道計画の段階で組み込む必要がある。

2) 考え B-1（環境容量という考え方）にしたがった場合

河道掘削は、しばしば河床の平坦化を伴う。平坦化は瀬と淵の消滅を意味し、自然環境にとっては悪影響となるが、もし平坦化された河床における砂州再生（タイプⅣの河道変化）が充分早ければ、一時の平坦化がさほど大きな影響を持たなくて済む。このことは、応答時間が、河道へのインパクトにどれほど寛容になりうるかを判断する重要な因子であることを示している。一般に、礫床河川のタイプⅣの応答時間は砂床河川のそれに比べずっと長いので（表-4 参照）、礫床河川の平坦化はハビタットに対し重大な影響を与えと言える。逆に、砂床河川の平坦化に対する許容度は大きいことが予想される。

3) 考え B-2（持続可能なミティゲーション）にしたがった場合

低流速域と多様な水理環境を創るため一定延長区間の河道が拡幅された場合を考える。タイプⅠあるいはⅡの変化として説明したように、拡幅後川幅縮小が起こることが考えられる。この場合、応答時間とパターンが問題になる。図-10(a) の応答 3) が現れる場合、拡幅の効果は長持ちするが、応答 1) が現れる場合、その応答時間が問題となり、それが短いと拡幅後の維持作業に苦勞することになる。応答 2) の場合には、その最終状態がハビタットとして良好かどうかを判断することになる。

4) まとめ

以上のように、河道変化のメカニズムをある程度理解した上で、河道変化をインパクト vs. 応答という切り口でとらえる。そして、この性質を表-4、図-10 のように定量表現することにより、種々の河道変化を河道計画へ体系的に反映することが相当程度可能と期待できる。このためには、様々な河道変化に対して、インパクト vs. 応答関係を設定する技術、応答を予測する技術が必要であり、河川応答の情報蓄積とともに、ここでの水工学の役割も大きい。

3. 3 河道変化の新たな項目に加えるべき現象

前節においては、主に、「河床変動」という水工学が従来慣れ親しんでいた視点から河道変化をとらえていた。今後も、河床変動が川の本質を示す最も重要な因子の1つであることには変わらないが、今後、河道計画が図-2に示したように外力～被害関係制御や川らしい川の追求など新たな展開を示していく中で、河道変化のとらえ方をさらに拡大していく必要がある。ここでは、重要と思われるいくつかの項目について触れる。

3. 3. 1 ハビタット

図-11 の概念図に示すように、河川におけるハビタット（生物生息空間）は、河川の物理的な作用に大きな影響を受けながら形成され変化する。河川ハビタットの固有性は河川の物理作用と切り離すことはできない。水工学は、河床変動に対して行ってきたと同様に、ハビタットを予測対象にしなければならない。ハビタット構成要素¹⁴⁾のうち、河床形状は従来の知見をほぼそのまま適用できるが（たとえば砂州の形成と瀬・淵との対応）、表層河床材料の状態や植物については、新たな水工学的研究を必要とする。植物は、河床材料や河床地形と同等に、河道を構成する重要な要素の1つと位置づけて¹⁵⁾、その動態予測にチャレンジすべきだろう。

ハビタット形成機構解明と予測においても、基本的には、水と土砂の動きという水工学が扱ってきた現象が基本になるが、その取り扱い方は相当変わらなければならない。河床変動予測とハビタット予測とは求められる情報の質が大きく異なるからである。多摩川の永田橋地区の代表的エリアで1968年以降に起こった樹林化（ニセアカシア）、安定的な植生域の拡大について、李らは図-12に示すシナリオを提示している⁸⁾。これによれば、1981、1982、1983年の洪水により、それまでの複断面化により発生していた高水敷的河床部分（礫床）にうっすら（数cmから最大でも40cm程度）ウォッシュロード起源の細粒土砂（シルト、微細砂を含む細砂）が堆積し、このイベントがその後の樹林化、安定域拡大にとって重要であった。従来の河床変動のとらえ方からは、ウォッシュロード成分で形成されるこうしたわずかな地形変化はさほど重要でないと言われていたが、ハビタット形成という観点からは、礫床の上に数cmでも泥が被るかどうかは、大きな違いをもたらす。図-13に示された礫床表面の3

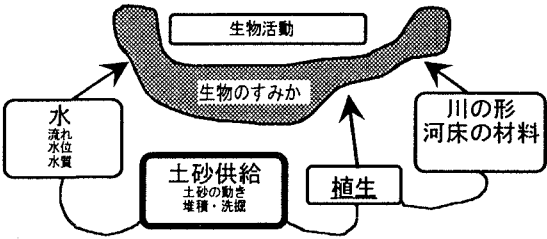


図-11 河川の作用とハビタット形成

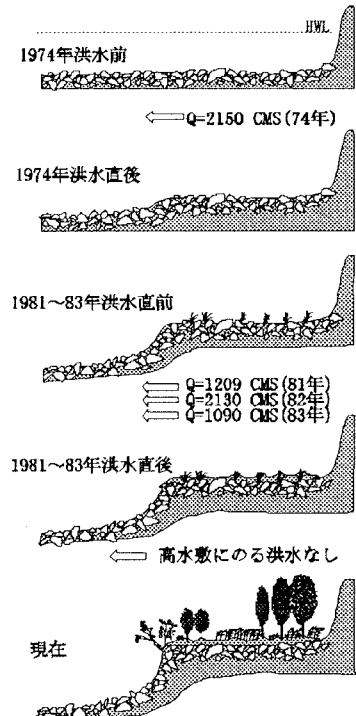


図-12 多摩川永田橋地区 52.4km 付近における安定植生域拡大シナリオ

つの状態は、河床変動という点からは有意な差があるとは認識されないが、ハビタット形成あるいはハビタット自身としては非常に重要な差があると見なければならぬ。ハビタット予測のために、水工学は、このような次元の異なる現象を対象にしなければならない。

河川植物の動態予測において生物学的知見が不可欠であることは言うまでもない。しかし同時に、河川固有の植物になるほど河川の物理的作用を強く受けて成り立っているはずである。河川の物理的作用が植物動態に及ぼす影響を一度徹底的に定量分析し、それによって植物動態がどこまで追跡できるか、その有用性と限界をはっきりさせ、その上で、生物学的アプローチと照合させること、さらに植物動態のコントロールを河川の物理作用の制御から行う方法に取り組むことは、植物動態の機構解明・保全全体の中で果たすべき水工学の重要な役割であろう。図-14 は、前述の多摩川永田橋地区を含む多摩川礫床河道区間で起こった代表的な安定的植生域について、図-14 礫床裸地から安定植生域への変化の道筋についての考察⁹⁾ そのシナリオを提示し、その中で河川の物理的作用（河床変動）の位置づけを把握する試みを行ったものである⁹⁾。代表的な物理作用である洪水の植生破壊を対象外としているにもかかわらず、広い意味での河床変動が植生動態に重要な役割を果たしていると言えそうである。

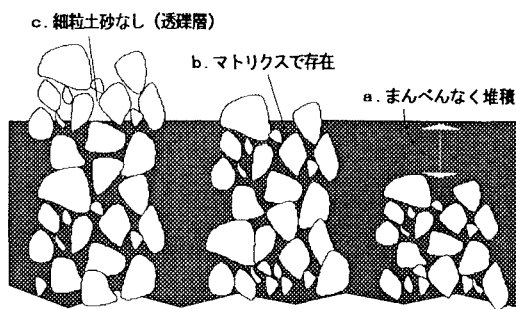
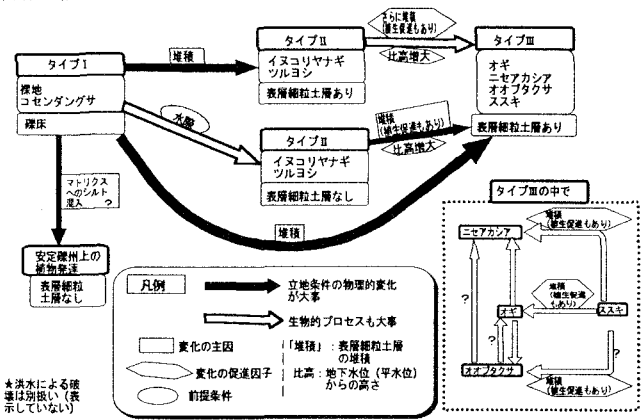


図-13 3種類の礫床表面状態



3. 3. 2 破堤現象—被害が発生するシナリオの整理の重要性—

堤防が洪水により破壊されると大きな被害が生じる。破堤防止の重要性は言うまでもないが、万一破堤した時に起こり得る状況を知っておくことは、2.2 で取り上げた外力～被害関係の制御を適切に図っていく上で不可欠であり、氾濫流の予測や地形変化がもたらす直接的被害の想定に役立つことはもちろん、堤防自身の設計・強化・管理の方針策定にも重要な情報となる。

図-15 は、米国のミシシッピ川水系で起こった 1993 年の大規模な洪水による破堤形態を分析した結果を示したものである¹⁰⁾。一口に破堤といっても様々な規模・形態があることがわかる。このような破堤形態は全く不規則に現れるのではなく、破堤点周辺の河道状況とかなり深い関係を持つことも明らかになっている¹⁰⁾。図-16、図-17 は、破堤点周辺の河道状況と破堤形態との関連を統計的（数量化Ⅱ類）に調べたもので、図-16 は砂堆積域の規模に対する各要因の支配度を（図-15 の砂堆積域なし(VとXI)、砂堆積域小(VIとVIII)、砂堆積域大(VIIとIX)の別)、図-17 は、洗掘領域と低水路の連結の有無に対する各要因の支配度を調べた（図-15 の連結無し(VVII)、連結あり(VIIIIX)の別）ものである。ここで、スコアが大きくなるほど、大きな砂堆積域が生じる可能性と洗掘域(落堀)・低水路水面が連結する可能性が高くなるように両図のカテゴリ・スコアが定められている。図-16 から、破堤が氾濫水の河川への戻り流れや堤内地での流れで生じるという条件は、砂堆積規模を小さくする圧倒的に大きな要因となること、非貯留型（堤内地に氾濫した水が貯留されずに流下する傾向を持ち、氾濫水の流勢の減速が起こりにくい型）や短絡型（非貯留型である上に、

破堤口から出た氾濫水が蛇行している河道を短絡するように流下するという型)は、砂堆積規模を大きくする要因であることがわかる。次に重要な要因は堤防沿いの樹木群帯の有無であり、樹木群帯の存在は砂堆積規模を小さくする要因となる。図-17からは、非貯留あるいは短絡型の平面形状が洗掘域と低水路水面との連結の可能性を高め、高水敷の存在がその可能性を低めること、両者の影響度が同程度であることがわかる。

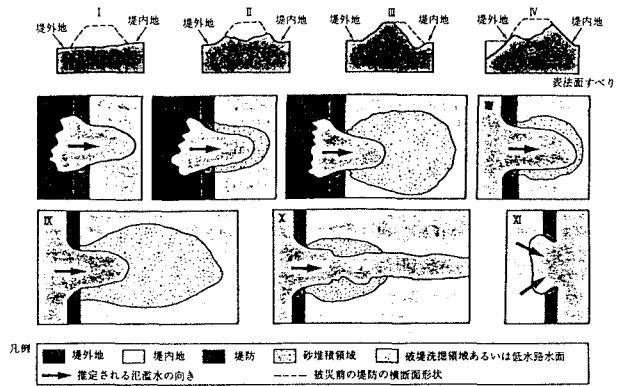


図-15 破堤形態の分類¹⁶⁾

このように、破堤に伴うこうした地形変化の規模は、破堤地点と周辺の堤防・河道法線の平面形や、堤防前面の高水敷・樹木群帯の有無など、堤防・河道自体の諸特性により有意に変わりうる。たとえば、蛇行河道においては特に破堤規模が大きくなりやすい場所が河道平面形との関係で存在すること、河道内の堤防沿いの樹木帯や高水敷の存在が破堤現象の規模を抑制する効果があることなどは、堤防設計や河道計画にとっても重要な活用すべき情報となる。

より広く言えば、被害を防止する直接の技術の充実とともに、被害発生シナリオの整理とその工学的裏付け(水工学や土質工学など)、可能性評価(信頼性評価手法)が、外力～被害関係制御に向けた車の両輪になるべきである。河道の整備・管理と災害発生リスクマネジメントとの関連性を明示する技術情報の一層の蓄積が望まれる。

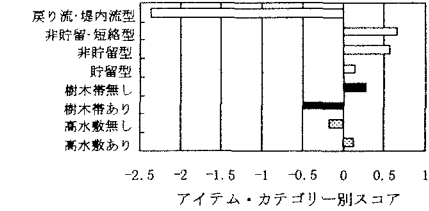


図-16 砂堆積規模に関する要因の影響度

3. 3. 3 河岸侵食

河道計画が目指すべき新しい方向を踏まえたとき、洪水による低水路河岸の侵食速度を予測できるかどうかは1つの技術的隘路であり、同時に、新しい河道計画の枠組みをつくる上での大きな鍵となっている。

低水路法線の性格としては以下の3つが考えられる。

- I：河道維持・安定のためのライン
- II：流下能力を確保するために必要なライン(利用可能な高水敷幅を示すライン)
- III：河岸・堤防侵食を防止し、堤防を守るための堤防防御ライン

低水路法線が異なる性格を持っているにもかかわらず、従来の河道計画では低水路法線が一本のラインで設定され、護岸がそれに沿って設置されることが多かった。さらに、河道特性や目的に応じた自由度を持った河岸設計が行われにくいなどの課題があった。こうした課題に対して、多自然型川づくりを契機として様々な工夫がなされるようになった。今後、こうした工夫が河道計画段階から体系的、根本的になされる状況を確認することが求められる。こうした認識の下、新たに「河岸防護ライン」の考え方の導入が検討されている。河岸防護ラインは、上記低水路法線の性格のうち流下能力確保に関係するIIを切り離し(IIについて別途考慮することはもちろんであるが)、主として性格I、IIIを持つラインを「河岸防護ライン」として抜き出し、河岸防御方針と合理的に関連づけようとするものである。性格I、IIIの違いによって、河岸侵食防止

図-17 低水路水面と洗掘域との連結有無に関する要因の影響度

の方針が変わりうるので、同じ河岸防護ラインであっても、侵食防止について色分けがなされるようになる。河岸防護ラインの導入により期待されることは以下のようである。1) 侵食防止工の目的、必要強度が明確になり、より合理的な河岸・堤防防御が実現される。2) 河岸・堤防防御にメリハリが付き、水際の自然環境保全とコスト削減（護岸不要区間の拡大；軽装護岸区間の拡大）、安全度向上（必要な区間はしっかり守る）に役立つ。3) 河岸防御工の着手の優先順位が明確になる。4) 河道（河岸）のモニタリング・管理の目標が明確になる。

このような河岸防護ラインを決めるためには、次のような技術情報を必要とする。1) 1回の洪水によって侵食される高水敷幅と洪水との関係。2) 洪水発生規模・頻度のシナリオが与えられた時の高水敷侵食速度：例、30年で30mなど。3) 低水路の安定、河道維持のコスト・労力という観点から守ることが望ましい河岸法線形。4) 堤防護岸が破壊されるリスク。粘着性を持つ河岸の侵食については、その技術的取り扱いが困難な状況にあり、それが上記情報の獲得を困難にしていた。しかし、近年、こうした河岸侵食についても工学的取り組みがなされるようになり^{18), 19), 20)}、河道計画に役立つ実用技術としても発展していくことが望まれる。

3. 3. 4 植生と粗度

植生繁茂状況と粗度の変化も、当然のこととして河道計画に組み込まれなければならない。近年は、3.3.1で例示したような植生変化だけでなく、人間が川に手を入れなくなったこと（負のインパクトと言える）による植生繁茂が起こりつつあり、このような状況変化への対応も河道計画に考慮して行く必要がある。

3. 4 河道変化コントロール手段の拡大

2.2あるいは3.2.5(2)に示した河道計画における河道変化の取り扱いを考えたとき、河道変化コントロールの手法を種々の意味で“拡大”することも重要な課題である。

3. 4. 1 流域と河川との関係に着目した河道変化コントロール

河川は流域からの物質供給を受けて成り立っている。多くの河道変化は、流域からの物質供給状況に依存する。したがって、河道変化を河道内で直接制御するよりも、物質供給をコントロールした方が、少なくとも流域～河川関係を考慮した方がうまく行く場合が多いはずである（実施の実際上の困難さの問題は別として）。特に、流域へのインパクトによる河道応答（表-4で言えば、間接的インパクト）を制御しようとする場合、河道への直接作用よりも、応答の原因である流域へのインパクトに働きかける方が理にかなっている。河川の制御を流域の視点から眺め河道計画に反映させることが、今後の大きな課題である。

たとえば、図-6のタイプⅠやⅡの応答速度は、供給されるウォッシュロードの量に大きく依存し、その量が少ない場合、無応答に終わることさえ予想される¹¹⁾。図-12に示したハビタット変化のスピードについても同様である。このように、河床変動やハビタット変化の多くは、上流からの土砂供給条件に強く規定される。こうした変化の理解、予測、制御において、流域からの土砂供給条件を考慮することは必然であろう。一口に土砂と言っても、その粒径や河道条件により、その役割は大きく異なる。土砂動態と河川の応答との関係を考える上では、以下に示す「有効粒径集団の考え方」⁷⁾をとることが有用である。

①水系内で移動する土砂は、すぐ後に説明する粒径集団によって、流送、河床材料との交換、河川地形への影響の仕方が大きく異なる（図-18参照）。②前章までの結果から、少なくとも図-8のような河川については、シルト・粘土、砂、砂利粒径以上という3つの粒径集団ごとに土砂動態を考えることが適切である。この場合、砂利の動きは砂利河床区間の河床変動を、砂の動きは砂床区間の河床変動を、シルト・粘土（一部細砂、微細砂を含む）は河岸・高水敷の形成や河口部の超低流速域での堆積、植物繁茂、河床表面のハビタット形成、栄養塩や汚濁物質などの物質輸送を支配する。これら種類の異なる河道変化を制御するためには、それぞれの河道変化を支配する粒径集団に着目して動態を追跡しなければならない。③このように「ある特定の河道変化」にとって有効な粒径集団を「有効粒径集団」と定義する。④水系環境変化に伴う河道変

化を予測するには、土砂生産域の状況との関連で、各有効粒径集団の供給量を予測あるいは少なくとも想定できなければならない。⑤シルト・粘土と砂の沖積河川への供給量については、土砂生産域の水系内各場所の土砂移動を順次追跡するアプローチを採るよりも、土砂生産域の全体状況と供給量とをマクロに直接関係づけておくことが工学的には有用である。これには、沖積河川上流端付近での浮遊砂観測による粒径集団別浮遊砂量測定を継続して実施することが役立つと考えられる。⑥砂利の沖積河川への供給量に関しては、砂利の移動がシルト・粘土や砂に比べ圧倒的に遅く、沖積河川区間近くでの山腹崩壊などの突発現象を除けば、変化が上流から下流に順番に伝わるので、水系各場所の河床材料の移動を順次追跡するというアプローチからの検討、より実際的には対象とする G セグメントのさらに上流一定区間での河道状況変化のモニタリングが有効である。この際、土砂生産域での砂利の生産は空間的・時間的非一様性が高いと考えられるので、この非一様性が沖積河川に届くまでにどの程度均され得るかという視点が特に大事である。

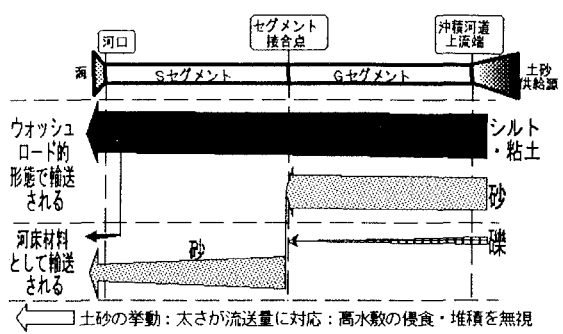


図-18 土砂移動形態説明図

以上のように、着目する河道変化に応じた有効粒径集団に適した分析手法を採ることにより、水系スケールの土砂動態を織り込んだ河道変化の工学的予測手法や制御法が得られると期待される。

3. 4. 2 河岸防御方式の多様化

3.3.3 で説明した河岸防護ラインを決めた後では、次のような情報が必要となる。1) 必要強度、目的に応じた多様な河岸防御法と効果（含：破壊リスク）、コスト。2) 着手の優先順位・タイミングを決めるための3.3.3 に示した侵食速度・幅に関する情報。3) 着手の優先順位・タイミングを決めるため河岸侵食状況のモニタリング情報（上記 2）と組み合わせる）。特に、1)に関しては次のような技術開発が求められる¹²⁾。①自然素材（土、植生）と従来型人工素材（主にコンクリート）との中間的な性質を持つ多様な素材・工法の開発。②河川の持つ自然力を最大限生かす工法の開発。この底流には、1)護岸を入れないという判断の拡大、2)自然素材、河川作用が元々持つ力・機能を最大限生かす、3)「0か1か」から「0～1」への防御技術体系の展開、という基本的考えがある。

このような河岸防御を実際に展開していくためには、河岸防御に要求される安全度・耐久性、復旧目標についての考え方、施工後のメンテナンス、モニタリング方法について十分な検討が必要である。

3. 4. 3 破堤規模のコントロール

破堤防止の方策（高規格堤防、フロンティア堤防などに代表される）に加え、万一の破堤時の災害規模を減少させる工夫を河道計画の中にも折り込む技術が、外力～被害関係制御をより一般化する上で重要である。3.3.2 に示したような破堤規模と河道状態との関係（たとえば高水敷や河道内樹林帯の幅および位置によって、破堤規模を抑制できる可能性があること）は、そのヒントになる。

3. 5 河道変化を尊重した河道計画に伴って現れる課題

今まで述べてきたような河道計画の考え方を実践することにより、新たな技術課題が生まれる。これらに先行的に対応することも重要である。

- ① 川らしさをもたらす河道変化（自然系にとって必要な河道変化）とは何か？ どこまでの河道変化なら、人間系にとって許容できるか？ 両者が衝突したとき、その折り合いを付ける意志決定を誰がどのように行うか？ 人間の働きかけにより川らしさが維持されるという側面をどう扱うか？
- ② 河道変化を尊重した河道計画において、河川の治水安全度管理はいかにあるべきか？ 予測の不確実な

部分をどう扱うか？ それをどう広い意味の河川管理につなげていくか？

- ③ 河道変化を尊重した河道計画において、河道情報の収集・整理・提示、維持管理、モニタリング、河道調査はどうあるべきか？

4. おわりに

川のありようを決める河道計画は、人間系と自然系とがどうつきあっていくか？という人類にとってのこれからの大課題の最も身近で象徴的な実践場である。このつき合いは“本格的”なものであるべきで、両方の結節点となりうる水工学（河川工学を支える）の果たすべき責務と役割は大きい。

謝辞：土木研究所山本晃一研究調整官からいただいた着眼点が本稿を執筆する上で役に立ちました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 水研究委員会：水と人のかかわりに関する研究—人と国土の新しい関係を求めて—、NIRA（総合研究開発機構）研究報告書、No.910006、1991。
- 2) Fujita, K. and Yamamoto, K.: Response of Alluvial River Channels to Human Activities in Japan, Proceedings of the PWRI-USGS Workshop on Hydrology, Water Resources and Global Climate Changes, 1992.
- 3) 建設省河川局治水課、土木研究所：河道特性に関する研究—その3—、～河床変動と河道計画に関する研究～、第45回建設省技術研究会報告、pp.696-737、1991。
- 4) 建設省河川局治水課、土木研究所：河道特性に関する研究—その3—、～河床変動と河道計画に関する研究～、第46回建設省技術研究会報告、pp.600-651、1992。
- 5) 山本晃一：沖積河川学、山海堂、pp.1-16、1994。
- 6) 山本晃一、藤田光一、赤堀安宏、太田知章：沖積河道縦断形の形成機構に関する研究、土木研究所資料、第3164号、1993。
- 7) 藤田光一、山本晃一、赤堀安宏：勾配・河床材料の急変点を持つ沖積河道縦断形の形成機構と縦断形変化予測、土木学会論文集、8月号、1998。（登載決定）
- 8) 李参照、藤田光一ほか：礫床河川の樹林化に果たす洪水と細粒土砂流送の役割、水工学論文集、土木学会、第42巻、pp.433-438、1998。
- 9) 藤田光一、渡辺敏、李参照、塚原隆夫：礫床河川の植生繁茂に及ぼす土砂堆積作用の重要度、第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集、1998。（登載決定）
- 10) 渡辺敏、藤田光一、塚原隆夫：安定した砂礫州における草本植生発達の有無を分ける要因、水工学論文集、土木学会、第42巻、pp.439-444、1998。
- 11) 藤田光一、John A. MOODY、宇多高明、藤井政人：ウォッシュロードの堆積による高水敷の形成と川幅縮小、土木学会論文集、No.551/II-37、pp.47-62、1996。
- 12) 宇多高明、望月達也ほか：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動、土木研究所資料、第3489号、1997。
- 13) 萱場祐一、島谷幸宏：扇状地河川における地殻状態の長期化とその要因に関する基礎的研究、河道の水理と河川環境シンポジウム論文集、pp.191-196、土木学会/建設省、1995。
- 14) 島谷幸宏、萱場祐一：河川の自然環境の保全とその構成、第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集、pp.153-158、土木学会/建設省、1997。
- 15) 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に関するシンポジウム論文集、pp.159-166、土木学会/建設省、1997。
- 16) 藤田光一：大規模破堤による地形変化の実態—1993年洪水直後のミシシッピ川水系の飛行機観察から—、土木研究所資料、第3526号、1998。
- 17) 塚原隆夫、渡辺敏、望月達也、藤田光一：礫床河川における水際環境の変化と洪水の作用、土木技術資料、第39巻5号、pp.30-35、1997。
- 18) 福岡捷二、渡邊明英、小俣篤ほか：河岸侵食速度に及ぼす土質構造の影響、水工学論文集、土木学会、第42巻、pp.1021-1026、1998。
- 19) 東京工業大学 福岡捷二研究室、建設省荒川上流工事事務所：河岸侵食・拡幅機構に関する研究—荒川上流部低水路河道を事例として—、平成6年3月。
- 20) 服部敦、湯川茂夫、布施泰治ほか：粘性土河岸の侵食量の現地観測とその予測技術に関する研究、土木学会年次学術講演会、第53回、II部門、1998（登載予定）。