

流砂系における土砂動態のとらえ方と 広域土砂動態制御への展望

建設省中部地方建設局三重工事事務所長

藤 田 光 一

土 木 学 会
海岸工学委員会・水理委員会
2000年8月

流砂系における土砂動態のとらえ方と広域土砂動態制御への展望

Keys to understanding catchment-scale sediment transport and a practical framework of comprehensive sediment management

藤 田 光 一

Koh-ichi FUJITA

1. はじめに

筆者は、流域～沿岸域にわたる広域の土砂動態制御というわかりやすい理念を実務に展開するために、次の3つの課題の克服が必須であると考えてきた¹⁰⁾。第一の課題は、流域～沿岸域全体の土砂輸送をとらえる“共通の見方”が確立されていないことである。流域～沿岸域という広い場での水と土砂の動きは複雑であり、その全体像をとらえるのは容易でない。そのため、どうしても個別箇所の現象理解と技術化が先行する。このような方法論に馴染みすぎると、流域～沿岸域全体の土砂輸送をとらえる際にも、個々の場所で確立したものの見方を延長しがちになるが、個別箇所に適したとらえ方が全体を幅広く見るには適しない場合も少なくない。この結果、流域～沿岸域の各場所を扱う分野単位で異なる“言語”が使用されることになり、いざ流域全体の話をしようとするとき、さらにそれを沿岸域にまで広げようとするとき、共通言語がなく、各分野の言葉の翻訳に多大な労力を費やすことになる。場合によっては、翻訳の必要性を共通に認識することにも時間を要する。流域～沿岸域全体をとらえる“共通言語”の確立が待たれる。

第二の課題は、時として、広域の土砂管理という理念が先行し過ぎて、管理自体が施策目標であるかのように（“管理のための管理”）錯覚されがちなことである。この場合、流域・沿岸域スケールで土砂の動態を詳細に把握すること自体が目標であるかのような誤解も生まれ得る（それはそれで価値があるが、実務への橋渡しという観点からは、達成までに要する時間の概念もなく遠大な目標にいたずらに取り組んでいるという見方もされよう）。場の管理はあくまで目標を達成するための手段であり、その根幹には管理の目的すなわち課題認識、課題解決の方向性がなければならない。流域～沿岸域管理の場合、対象とする場が広く、その中での課題が多数あるため、多様な課題を包括的に解決できるかもしれない総合管理という手法に目が行くのはある意味で当然ではあるが、何が解決すべき課題かを明確にしておくことは、管理云々以前に重要である。理念先行でここが曖昧になると、実務への橋渡しが難しくなるように思う。対象流域～沿岸域に関して、1)既に起こった、2)今起こりつつある、3)今後起こりうる課題を、全ての分野について洗い出し、また、これらの課題の解決目標を明確にして、流域～沿岸域全体の土砂輸送と関連づける手法を整備することが必要である。

第三の課題は、洗い出された各課題の解決法を流域・沿岸域全体の視点で案出・調整する場が十分でないことである。流域～沿岸域のように広い場での総合施策においては、前述のように、目標が複数となり、相互に衝突することが少なくなく、したがって目標レベルだけでなく目標達成手段・手順についても高度な調整を行う必要が出てくる。こうした調整の方式については、相当程度、社会科学的、政策的研究の成果に依存することになるであろうが、そうした調整の土台が、その場に出される科学的・技術的情報であることも銘記すべきである。したがって、調整の場において必要となる技術情報、逆に、提示できる／できない技術情報を研究段階から並行して検討することも非常に大切である。筆者は、このために、管理の“計画論”をあらかじめ検討しておくことが重要と考えている。

本稿では、これら3つの課題解決に資すると期待される考え方、ものの見方を、筆者なりに述べようとするものである。具体的には、第一の課題に対して「水系土砂動態マップ」作成の重要性を6章で述べ、第二の課題に対して「有効粒径集団」の考え方の有用性を5章で説明し、第三の課題に対して、広域土砂動態制御に向けての調整のあり方（計画論）のたたき台を7章で提示する。また、これらの課題への取り組みに際しては、「流砂系における広域土砂動態」を強く意識した「土砂動態のとらえ方」を持つことが基本となるが、これが従来の土砂水理学的見方とやや異なるため馴染みにくい面もある。そこで、5・7章の準備段階として、2・4章において、広域土砂動態制御に必要と考えられる土砂動態のマクロなとらえ方について述べることにする。そこでは、扱うべき土砂の粒径範囲が非常に広いことを認識すること、河床材料や土砂輸送を考える際、時間および空間スケールを大きく取る必要があること、このために、細部に過度にこだわることなくマクロに全ての要素をとらえ、その上で必要なら細部に入っていくというアプローチが重要であることを強調している。

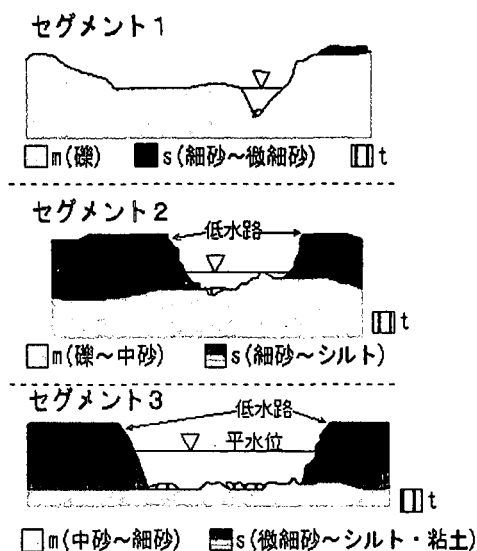
2. 河床材料の見方

河床材料は縦断的にも横断的にも深さ方向にも大きく変化する。ある特定の河床材料に着目して調査、分析を行うときには、対象とする河床材料がどのように堆積し、どのような働きを持つかを大まかに“イメージ”し、自分が着目した材料の土砂動態全体の中で位置づけを理解しておくことが大切である。このイメージの作り方について、著者は次のような見方が参考になると考えている。

(1) 河道横断面内での河床材料の分類¹⁾

河床表面を見ながら、川を横断方向に何度か歩いてみると、非常におおざっぱに言って、3種類の土砂集団に分けられそうに思うことが多い。1つは、流れを頻繁に受けそうな低い河床領域にある、最も粗い粒径の集団である。これを材料 m(Main 材料)とここでは呼ぶ。次は、材料 m が存在する場所の脇の高い河床部分にあるもので、材料 m の平均粒径よりも1オーダー以上粒径が細かい材料からなる集団である。これを材料 s(Sub 材料)と呼ぼう。最後は、平水時に水面下となる河床部分の一部に存在するもので、材料 m の上に（多くの場合薄く）乗った材料であり、粒径は材料 s 程度あるいはさらに細かい（有機物を含む）ことさえある。これを材料 t(transient 材料)とおく。

この材料 m、材料 s、材料 t の横断面内での存在パターンは、山本による河道セグメント分類の区分²⁾³⁾ごとに異なる。河道セグメントとは、縦断方向に河道の特性（河床材料、横断形状、勾配、洪水時水理量など）がほぼ一様な区間を指し、多くの沖積河川は、いくつかの河道セグメントが接続して形成されていると見ることができ、河道特性理解の基本単位となる。図-1に、材料 m、s、t の横断面内の存在パターンを模式化して描いてみた。セグメント1では、河岸部を含め大部分を材料 m が占め、一般に材料 s は、見られないが、ごく薄く堆積しているに過ぎない。それがセグメント2になると、低水路の川底と高水敷の深い部分は材料 m であるが、低水路河岸と高水敷は材料 s で占められる。セグメント1でも2でも、材料 t の存在は淵



の底など限定された範囲にとどまり、全然見られない場合もある。セグメント3では、材料mとsの存在パターンはセグメント2の場合と大きくは変わらないが、材料tが空間的にも時間的にもより存在しやすくなる。

材料mは河床材料の“主役”と言える。材料mは、安定的に存在し、河道の骨格である縦断形状や砂州形状、低水路の粗度係数、構造物の設計に必須の深掘れ深、ハビタットの評価に重要な瀬・淵の形態などを規定する。「河床材料」と言えば自動的に材料mを指すことが多い。河道特性調査で整理される粒径³⁾や、河床変動計算を行う際の河床材料粒径には、材料mのものをを用いる。材料mを調べるとき、サンプリング地点を河道状況に応じて適切に決めることは容易でない。通常は、一定間隔で機械的にサンプリングを行うと良い³⁾。河道セグメントごとに、得られた全ての粒度曲線を書き込むと、狭いバンドに集中する曲線群が見えてくるはずであり、これを材料mの代表的な粒度曲線とする。ただし、サンプリングが機械的なだけに、分布の中に材料tが混じることがある。しかし、材料tの粒度曲線は明らかに材料mからはずれるので、そのデータを排除することは容易である（これも含めて平均などしてはいけない）。ただし、セグメント3の一部区間やある条件下では、材料tが材料mと同等に優勢か材料mを凌駕しているように見えることもある。そのような場合には、2つの異なるバンドに集中する粒度曲線群（mとtに対応）のどちらを主役とするかについて、慎重に判断しなければならない。

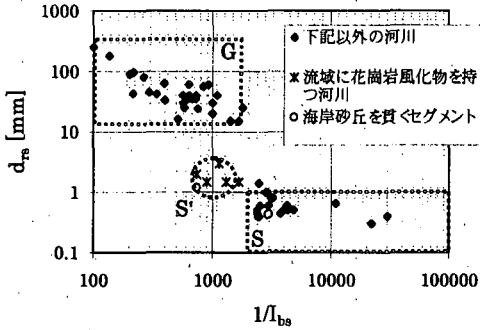
材料sは材料mの“相手役”と言える。主流路の脇で、浮遊してきた細粒土砂を堆積させることで材料sからなる河床ができる。材料sはセグメント2と3では高水敷の本体を構成するまでになる。ここでの材料sの情報は、低水路河岸の侵食形態・速度の予測や護岸の必要性の判断、水制などによる材料sの堆積促進効果の判断、低水路川幅拡幅後の土砂堆積による川幅縮小の推定などに必要となる。また材料sは、粒度の面でも場所的にも植生繁茂に好ましい条件を持つので、密生した植生を持つことが一般的である。図-1に示したように、セグメント1での材料sの堆積は、あっても一般に薄い。しかしそこでは、材料mである礫が露出している場所に比べ植物がずっと繁茂しやすい。植物繁茂を分析する際にも、材料sの調査は重要である。

材料tは河床材料の“端役”と言える。材料tの存在は、一時的で不安定なことが多く、ちょっとした出水があるとフラッシュされる。そういう意味で材料tは、材料m、sのような“本格的な”河床材料とは呼べない。しかし、材料mが一時的にせよ部分的にせよ材料tに覆われることは、ハビタット構造の変化として重要であり、平水が長く続くときの物質循環にも影響を与える。さらに、流域の変状による供給土砂の変化が材料tの挙動にいち早く現れることも考えられる。こうしたことから、今後の水環境管理において材料tの重要性が増すことが考えられる。材料tに関する調査としては、粒度のほか、存在範囲とそのタイミングが重要である。

(2) 河床材料の縦断的变化

最初に、材料mについて述べる⁴⁾。日本の代表的河川の各河道セグメントについて、河床材料の代表的粒径 d_{rs} （1つのセグメント内の60%粒径 d_{60} の平均値）と代表的河床勾配 I_{bs} （1つのセグメント内の河床勾配 I_b の平均値）との関係を整理すると、次の2つのパターンに分けることができる。1つは、図-2a)に示すように、1つの河川内のすべての河道セグメントが $[d_{rs} \geq 15\text{mm}, I_{bs} \geq 1/1500]$ のグループ（以後Gセグメントと呼ぶ）、 $[d_{rs} \leq 1\text{mm}, I_{bs} \leq 1/2000]$ のグループ（以後Sセグメントと呼ぶ）、 $[d_{rs} = 1 \sim 3\text{mm 前後}, I_{bs} = 1/1000 \text{ 前後}]$ のグループ（以後S'セグメントと呼ぶ）のいずれかに入る河川である。もう1つは、図-2b)に示すように、1つの河川内の河道セグメントの中でG、S、S'のいずれのグループにも入らない中間的なセグメントを1つ以上持つ河川である。前者のうちSあるいはS'セグメントを持つ河川をタイプA河川、Gセグメントしか持たない河川をタイプB河川と呼び、後者をタイプC河川と呼ぶことにする。なお、S'セグメントを持つのは流域の大部分に花崗岩風化物を持つ河川である。なお、山本による河道セグメント分

a)タイプ A, タイプ B 河川



b)タイプ C 河川

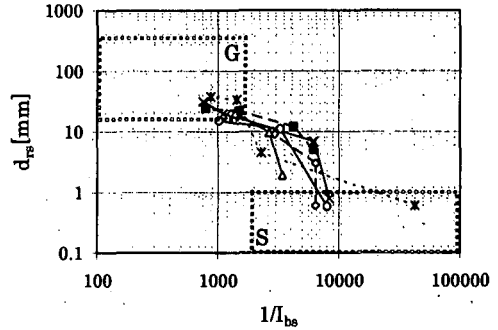


図-2 河道セグメントの河床勾配と河床材料粒径との関係

類 2³⁾におけるセグメント 1 とセグメント 2-1 が G セグメントに、セグメント 2-2 とセグメント 3 が S セグメントに対応する。

タイプ A 河川のほとんどは、G セグメントの下流に S セグメントが接続するパターン、すなわち急勾配砂利河道から緩勾配砂河道に急変する縦断形を持ち、縦断形に明確な勾配急変点がある。またタイプ A 河川は、規模の大きい沖積平野を持つことが多い。一方、表中のタイプ C に属する河川は、大きな沖積平野を持たないことが多く、また、沖積河道区間に支川を多く持つ。タイプ C 河川は、数多くのセグメントを経て河床勾配と粒径が減少する縦断形を持ち、タイプ A 河川ほど大きな勾配急変がない場合が多い。

図-2 からわかるように、タイプ A 河川では、G セグメントに分類される上流河道区間と S セグメントに分類される下流河道区間で河床材料粒径が大きく異なる。このため、上流河道区間の河床には、下流河道区間で河床材料となる粒径成分がわずかしかな存在しない。

材料 s、材料 t の縦断変化については、材料 m に比べ調査事例が少なく、体系的な分析はまだなされていない。いくつかの調査事例⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾からつかむことができる傾向を試行的に表示して、上記の材料 m の特性と合わせたのが表-1 である。この表から、流砂系における土砂動態の全体像をつかむためのポイントをいくつか指摘できる。第一は、従来河床材料調査の対象となっていた材料 m は、重要ではあるが沖積河道を構成する材料の一部に過ぎず、これだけに限定しないで材料 s、t を含めて河道を構成する材料を幅広くとらえておくことの重要性である。第二は、河床材料の粒径が縦断方向に大きく変化することが一般的なので、当該セグメントの材料だけに着目するのではなく、当該河川を構成するセグメント全てにおける河床材料の存在状況を把握しておくことの重要性である。第三は、粒径が異なる（互いの粒径範囲が重ならない）材料の組み合わせが多いことに着目することである。たとえば、材料 m と材料 s、t の粒径はすべての河道セグメントで

表-1 沖積河道における河床材料の存在状況

	河道セグメント分類 (カッコ内は材料 m に着目したもの)				
	上流← セグメント 1 (G セグメント)	セグメント 2-1 (G セグメント)	セグメント 2-2 (S セグメント)	セグメント 3 (S セグメント)	→下流 海岸・沿岸部 ★
材料 m	礫以上	礫	砂(粗砂～中砂)	砂(中砂～細砂)	
材料 s	細砂中心(中砂～シルトが混じること) ⁵⁾⁶⁾	細砂、微細砂、(シルト混じりが多い) ⁷⁾	シルト混じりの細砂および微細砂、シルト ⁸⁾	シルト混じり微細砂、シルト(粘土が混じること)	
材料 t	中砂以下?	中砂以下?	微細砂以下?	シルト以下?	
海岸・沿岸にかかわる材料分類★					★

注)河川から供給される土砂が海岸・沿岸にとって重要な場合、★印の部分を入れることが重要。

互いに異なり、また、材料 m だけで見ても、G セグメントと S セグメントの粒径は異なる。粒径の異なる材料間では流砂系における動態のパターンが異なっていると見ることができ、表-1 のような整理から、同じような動き方をする粒径の集団について当たりをつけておくことは重要である（このことについては4章で詳述する）。表-1 からは、沖積河道を構成する材料の全体像をとらえる上で、少なくとも礫以上、中砂程度、微細砂以下という3つ粒径集団を考える必要があると言えそうである。

なお、表には、海岸部・沿岸部も形だけ加えている（★印）。河川から供給される土砂の海岸地形などへの寄与が有意な河川・海岸を対象にする場合には、海岸部の材料について同様の整理をする必要がある。たとえば、海岸・沿岸の構成材料が直近の河道セグメントの材料 m なのか、材料 s に対応するものか、さらに細粒なのかなどの区別は、河川～沿岸間の流砂系を考える際の基本情報となる。このような整理は、海岸と河川の材料の粒度曲線を重ねて表示するだけでも相当程度進む。

3. 沖積河川に供給される土砂

沖積河道の河床材料（場合によっては海岸材料も）が土砂生産域から沖積河川への土砂供給状況を反映したものであることに間違いはないが、供給土砂と堆積した材料とが一对一の関係にあるとは限らない。沖積河川に供給される土砂を別途把握しておくことも必要である。

図-3 に、代表河川の沖積平野への土砂供給について、沖積平野の体積から求めた1万年程度の年平均値と、ダム堆砂量から求めた10～30年程度の年平均値を、比供給土砂量の形にして示す⁹⁾。供給土砂量から比供給土砂量を求める際に用いる土砂生産域面積は、沖積平野上流端から見た流域面積としている。ここでは、供給土砂量を1年当たりの堆積した状態での体積(空隙を含む)で表現している。この図から、算定期間が大幅に違うにもかかわらず、2つの方法による供給土砂量は信濃川と淀川を除き近い値にあることがわかる。信濃川・淀川については、沖積層体積から求めた値がかなり小さくなっている。この原因の1つとして、先に述べたダム堆砂量による供給土砂量評価がこれらの河川で過大になっている可能性が考えられる。この他に、上流に盆地があり、そこでの堆積量を考慮していないことに関係している可能性がある。信濃川の沖積層体積から求めた比供給土砂量については、長野盆地上流域で生産された土砂が新潟平野には供給されないものとし、長野盆地上流域を土砂生産域から除外して算定した結果についても併記してある。信濃川への超長期（1万年）の平均供給土砂量はこれら2つの値の間にあるものと考えられる。芦田・奥村¹⁰⁾は、ダムの堆砂量から土砂生産量の全国的傾向を分析している。図-4 は、彼らの図を再構成し、その上に沖積層の体積計測により求めた超長期の平均の比供給土砂量をプロットしたものである。この図から、超長期平均の比供給土砂量が、全国のダム比堆砂量分布の範囲内にあることがわかり、また地域的変化特性にもかなり共通点

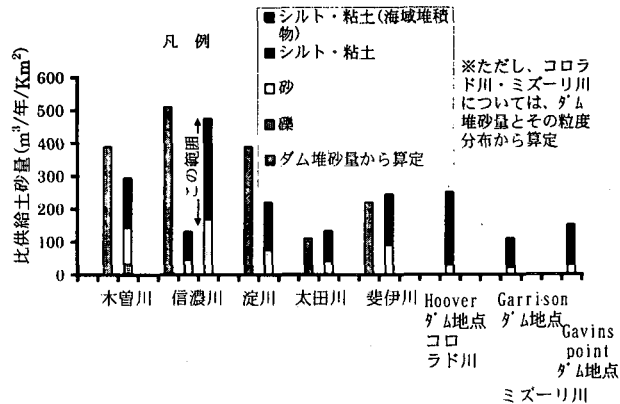


図-3 沖積平野堆積構造から調べた粒径範囲ごとの沖積河川への土砂供給量

があるように見える。以上のことは、研究対象とした日本の河川について、最近数十年の供給土砂量と過去1万年程度の超長期の平均供給土砂量との差が大きくても数割の範囲内にあった可能性が高いことを意味している。

さて、図-3 から供給土砂の粒径について見ると、対象河川による大きな違いがなく、いずれも砂利：砂：シルト・粘土＝(0%～10%):(35%～40%):(50%～65%)程度の構成比となっている。このことは、供給土砂の大部分が砂とシルト・粘土で占められていること、特に細粒分(シルト・粘土)が多いことを示し

ている。全供給土砂のうち細粒分が多いというこの傾向は、米国を流れるミズーリ川とコロラド川についても同様に見られる(図の右から3つの棒グラフ)。以上から、材料 m よりも小さい粒径成分が全供給土砂量の相当程度を占めるという特徴は、多くの河川に当てはまると言えそうである。河床材料として一般的な砂や礫に比べ、河床材料になりにくいので目立たないシルト・粘土の供給量が実は大きく、こうした細粒土砂の潜在的影響力が大きいこと、その一部が材料 s や材料 t になっていることが理解される。

4. 流砂系という観点からの土砂輸送形態のとりえ方

3章で述べた供給土砂(図-3のような)の一部あるいは全てが堆積し2章で述べた河床材料(あるいは海岸材料)の存在状況(表-1のような)が決まる。この間をつなぐのが「土砂輸送形態」である。これについては、水理的な観点から「掃流砂、浮遊砂」という流砂形態の分類がなされ、また流砂の起源に着目した分類として、「wash load, bed material load」の区別がある¹¹⁾。著者は、流砂系における非常に幅広い粒径からなる土砂の輸送を大局的にとらえるために、もう一つ、「混合型、通過型」という分類が必要になると考えている。ここでは、これを「流砂系という観点からの土砂輸送形態の分類」と呼んでいる。水理的な観点からの分類はある地点のある瞬間の土砂流送の形態に基づくものであり、流砂の起源に着目した分類は、文字通り、一出水程度の時間スケールで見た流砂の起源による分類であるのに対し、「流砂系という観点からの土砂輸送形態の分類」では、河道セグメント単位に土砂輸送をとらえ、後で述べる「粒径集団」に着目し、長期に渡る(多くの出水、平水時も含む)土砂輸送とその結果(分級、堆積、地形形成)を強く意識したもの

表-2 流砂系という観点からの土砂輸送形態の分類と他の分類法との対応関係

流砂系という観点からの土砂輸送形態の分類 (ある粒径集団に対して)	従来の分類	
	水理的分類 (流砂形態に着目)	一出水程度の時間スケールで見た(?)土砂起源による分類
混合型： その場所の主河床材料(材料 m)と有意に混じり合いながら輸送される。材料 m にかかわる河床変動に寄与できるが、その時は、自身の流送量も縦断的に変化する。材料 m の流送はもちろん混合型である。	掃流砂または浮遊砂	Bed material load
通過型： その場所の主河床材料(材料 m)と有意には混じり合わない(材料 m の隙間を満たす程度)。材料 m にかかわる河床変動にほとんど寄与できない。その場所は“通過区間”で、自身の流送量の縦断変化は小。一部が材料 s や材料 t になるが、その量は、多くの場合、全フラックスに比べれば小さいと考えられる。	多くの場合、浮遊砂。小出水時、平水時には掃流砂のこともあり。	多くの場合 Wash load。 小出水時、平水時には、Bed material load のこともあり。

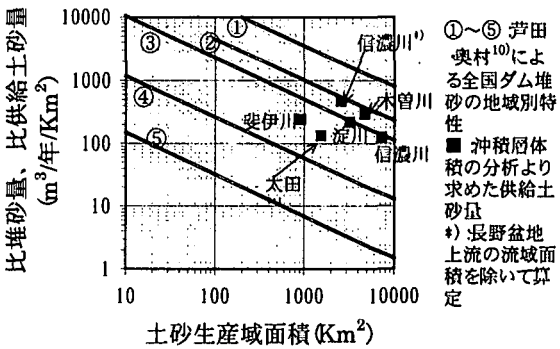


図-4 比供給土砂量と土砂生産域面積との関係

である。これらの関係を、混合型、通過型の説明とともに、表-2 にまとめて示す。

混合型、通過型を決める最も重要な因子は、河床の主材料（材料 m ）と有意に混じり合うかどうかである。これを判断するには、掃流砂・浮遊砂の別、wash load・bed material load の別を見るだけでは不十分であり、着目したセグメントにおいて着目した粒径集団が、いかなる水理条件においても、そのセグメントの材料 m と同じ流砂形態をとらないかどうかを見る必要がある。たとえば、G セグメントにおける主河床材料（材料 m ）である礫（粒径 2cm 程度としよう）と、そこに供給される中砂（0.4mm 程度としよう）の関係を考える。両者の粒径比が 50 倍もあるため、中砂が掃流形態で輸送されているとき材料 m である礫は動かず、礫が動き出した時、中砂は浮遊形態で輸送され、さらに流量が増しても、礫は常に掃流形態で輸送される。したがって、平水から洪水に至るいかなる流量条件においても、礫と中砂は、掃流・浮遊に関して同時に同じ流砂形態を取ることはなく、したがって、礫である材料 m と中砂が混じることは、礫の隙間を中砂が埋める形を除いては無い。このような状況では、礫の流送量に比べ中砂の流送量が圧倒的に多い場合（それが普通である）、このセグメントでの中砂の輸送は、その量が大きいにもかかわらず、材料 m からなる河床の変動に寄与することが無く、また、中砂の流送量を縦断的に大きく変えることはない。以上から、ここで取り上げた中砂集団は当該セグメントでは通過型と判定される。なお、こうした考えの詳細は文献(9)を参照されたい。

通過型・混合型という分類は、すぐ後で述べるように、著者らが前述のタイプ A 河川の縦断形形成と材料 m に関する縦断的分級の機構を実験的あるいは計算上理解・解明する際に非常に有用であった⁹⁾¹²⁾。また Parker は、通過型とほぼ同じ意味で“throughput load”という言葉を用いており¹³⁾、Parker・Cui は、throughput load の概念を用いて、タイプ A 河川のように急勾配礫床区間から緩勾配砂床区間に不連続的に変化する河道について、それが見かけ上平衡状態になりうることを、沖積平野の地盤沈降速度を考慮して理論的に説明している¹⁴⁾¹⁵⁾。江頭らは、木津川における河床変動と河床材料の縦断分布の時間変化を長期予測する上で、淵の材料（材料 t 、場所によっては材料 s に相当すると考えられる；筆者の解釈）が瀬の材料（材料 m に相当すると考えられる；筆者の解釈）と混合しないまま輸送される場合、これを便宜上“オーバーパッシングロード”と呼び、この概念を予測計算に取り入れている¹⁶⁾。土砂の輸送形態に関するこれら 3 つのとりえ方はよく似ており、流砂系における土砂動態を大局的に理解する際に重要な概念になっていくと考えられる。本稿では、通過型・混合型という呼び名を以後も用いる。

5. 課題認識、目標特定の道具としての「有効粒径集団」というとりえ方

前章までに述べた基本的知見を踏まえ、本章から、広域土砂動態制御につながるポイントを説明する。ここでは、まず「有効粒径集団」を取り上げる。

(1) 沖積河道形成のとりえ方

図-3 に示したような土砂供給特性と表-2 に示した土砂輸送のとりえ方から、図-5 に示すように、沖積河川の河道セグメントの形成機構や材料 m 、 s 、 t の堆積機構がマクロに説明できる⁹⁾⁷⁾。ここで、図-5 は、①上流から下流に向けて、礫は[表-2 の輸送形態の混合型→停止]、砂(微細砂を除く)は[通過型→混合型]という変化をたどり、礫(G)のセグメント、砂(S)のセグメントが形成されること、②砂のセグメントには、實際上、土砂生産源から主河床材料（材料 m ）である砂が直接供給される形になること、③細粒土砂（細砂～シルト～粘土）は、その一部が高水敷や表層細粒土層（材料 s へ）、河口付近（材料 t へ）の河床材料になるものの、多くが海へ流出することを示している。

(2) 有効粒径集団の説明

上記(1)に示した沖積河道形成過程における土砂動態から、以下に示す“有効粒径集団”という見方が自然に生まれる。すなわち、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(表-2、図-5 参照)。したがって、土砂をひとくくりに扱うことは無意味である。②多くの場合、細粒土砂(シルト・粘土、細砂と微細砂を含む場合も多い)、砂、礫という3つの粒径集団ごとに土砂動態を考えることから始めるとよい。この場合、礫の動きは礫床区間(G セグメント)の河床変動を、砂の動きは砂床区間(S セグメント)の河床変動を、細粒土砂は表層細粒土層(植物繁茂に深い関連)や河岸・高水敷の形成、河口部の超低流速域での堆積(干潟形成)、栄養塩や汚濁物質などの物質輸送(含; 海への供給)を支配する(河床材料で言えば、s や t)。③海岸の地形形成にと

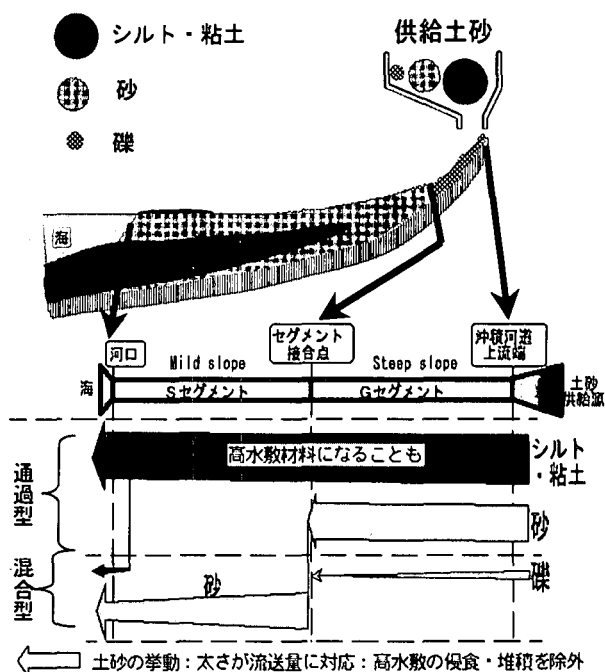


図-5 河道縦断形の形成、河床材料分級とマクロな土砂収支

っては、最下流の河道セグメントの材料 m が重要な役割を果たしている可能性が高いが、地形形成を司る材料の粒径によっては、さらに細粒の土砂が有効になる場合もある(だから、表-1のように、河川と海岸の材料を一緒に整理することが大事である)。④これら異なる現象を制御するためには、それぞれの現象を支配する粒径集団に着目して動態を追跡する必要がある。逆に、すべての粒径集団を追うことは必ずしも合理的でない。⑤このように「ある特定の河道変化や現象」にとって有効な粒径集団を「有効粒径集団」と定義する。⑥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。⑦細粒土砂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(流量 Q ~ 着目土砂の流送量 Q_s の関係把握が基本)。⑧礫の沖積河川への供給量に関しては、礫の移動が細粒土砂や砂に比べ圧倒的に遅く、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。特に、豪雨等による大規模山腹崩壊などがもたらす突発的、大規模な土砂流出については留意が必要である。

(3) 有効粒径集団の見方に基づく課題の把握

土砂の輸送に関係する流域・沿岸域での諸現象の変質は、前節で説明した有効粒径集団の動態変化により引き起こされるという見方ができる。有効粒径集団の動態と各現象との関連を明確にした上で、有効粒径集団の動態変化がもたらした/もたらしうる各現象の変化とその課題を大局的な観点から分析することにより、流域・沿岸域の管理に関する課題をある程度系統だって把握できる可能性がある。こうした着眼点の有効性

を検討するため、手近な事例について、＜有効粒径集団の動態変化＞～＜現象変化＞～＜課題認識＞という三者のつながりを調べてみる。

a) 礫および砂の供給量変化が起こす河床縦断形変化(変化速度の大局的把握)

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(起こりうる)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。

代表的なタイプA河川を想定し、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。詳細は文献9)を参照されたい。

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こり得る。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。得られた各変化速度の見積り結果を図-6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、礫の流量が元々少ないことと、礫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(ただし、礫の供給量が非常に小さい場合には、Gセグメントについての①の速度が、地殻変動のオーダーになることもあり得る)。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10²mm/年のオーダー)と比較するとお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、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言えそうである。ただし、河床低下は河道全幅で一様に起こるとは限らないので、実際には、河床低下過程での河床の平面的形状に留意する必要がある。さらに、表層礫材料のモビリティの低下がもたらす環境上の影響についても検討が必要である。すなわち、表面とそれを剥いだすぐ下の河床材料との違いは時として大きな意味を持つ。たとえば、アーミングの進んだ礫床においては、表面粒度

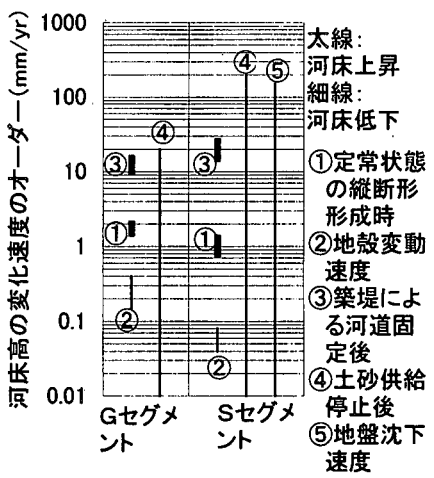


図-6 モデル沖積河川の要因別縦断形変化速度のオーダー見積もり

に比べ表層下の粒度が小さく、この差が土砂の動きに大きな影響を与える。生物活動にとっては、河床表面は特別に重要な意味を持ち、それは単なる粒度分析だけでは表しきれない。礫床表面に関しての、浮き石・はまり石の区別、透かし礫層の存在、礫の移動頻度などは、様々な生物のハビタットや植物繁茂を分析する上で重要な情報となる。

このような各粒径集団の動態変化（本事例の場合供給量変化）がもたらしうる河道変化速度の評価を通じて、各課題の質や優先順位を把握することができる。

b) 細粒土砂による水際環境形成（植物の繁茂、河岸形成）⁵⁾⁷⁾

1) 細粒土砂（シルト・粘土；細砂、微細砂を含む場合も多い）は、図-7 に示すように表層土層、高水敷の材料（材料 s）となり、密生した植物の繁茂と河岸・高水敷形成を支配する。セグメント1（扇状地河道）では過程(2)、(3)と過程(4)が拮抗し、この粒径集団の堆積厚は“表層”細粒土層にとどまる（厚させいぜい数十 cm）。セグメント2-1、2-2（自然堤防帯）では[過程(2)、(3)]>>過程(4)となり、堆積厚は通常の高水敷厚さに達する。2) この粒径集団を堆積させる条件を満たす河床部分は通常そう多くないが、もともとの通過量が多いので（図-3 参照）、ひとたび堆積条件を満たす河床場ができると、かなり早く現象が進むと見て良い。3) この粒径集団の供給量が減ると（土砂濃度の減少）、上記の現象の“活性度”は鈍る。逆に、土砂濃度が大きくなると、活性度が高くなる。この粒径集団は概ね Wash load に対応することから、一連の現象が土砂生産場の変化と直接的な結びつきを持つと言える。

c) 細粒土砂による河口環境形成

上記の水際環境形成に使われる細粒土砂量は、通常、その供給量全体から見れば少量であるが、河口など低流速域や停滞水域まで来ると、その相当量が材料 t として（場合によっては材料 m として）堆積する“チャンス”が出てくる。堆積の有無を決める水理条件は一般に微妙であり、堆積が起こらない条件から堆積可能な条件に変わった場合に生じる堆積量は相当多いと予想され、これは河道維持、水環境、河川～海岸の土砂連続性確保という観点で重要な現象となる。したがって、河口条件の変化が細粒土砂の動態に与える影響を予測することは重要である。後で述べる瀬沼川河口（瀬沼への）付近における粒径集団別の土砂動態図（図-9）からは、上流の土砂生産源から流送量をあまり変化させずに河口まできた細粒土砂の粒径集団が、河口から湖底にかけて本格的に堆積し、河口テラスや瀬沼の底質条件を支配するようになることがわかる。この粒径集団の動態変化は、河口および湖底の底質環境の変化に直結する。

d) まとめ

以上に示した事例は、いずれも、1) 有効粒径集団を特定した上で、2) 当該粒径集団と対応する現象との関係把握を行い、3) 粒径集団の水系内での動態の分析・予測を行い、4) その動態変化がもたらした／もたらしうる現象変化と課題を明らかにした上で、4) 課題解決のために粒径集団の動態を制御する手法の案出を行うという検討ステップにつながるものである。この検討ステップは、課題把握や管理目標の設定を体系的に進める上で有効と考えられる。＜有効粒径集団の動態変化＞～＜現象変化＞～＜課題認識＞という関係のパターン、分析事例を多くの種類の現象について蓄積しておくことにより、この有効性はさらに高まると期待され、このこと自体が重要な調査研究ターゲットとなろう。河川からの土砂供給の変化が海岸・沿岸に及ぼす

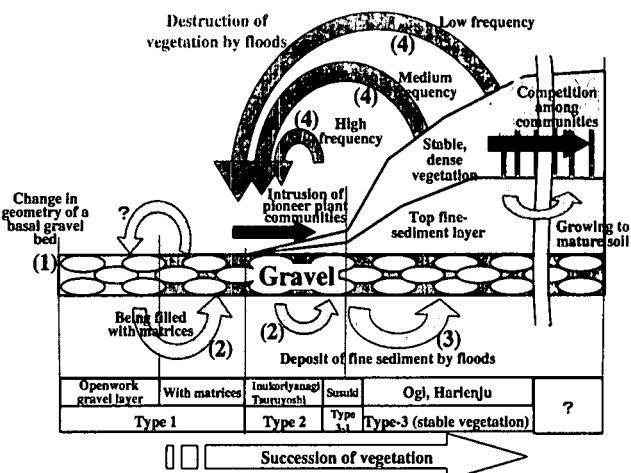


図-7 細粒土砂（材料 s）が起す植物繁茂の仕組み

影響についても同様の検討を行う必要があり、またそれを実施することが河川と海岸の現象を流砂系という観点で関連づけることにつながるはずである。

6. “共通言語” 獲得の一助としての水系土砂動態マップ

(1) 水系土砂動態マップとは何か？

水系一貫の土砂管理においては、土砂動態を水系スケールでとらえる全体的視野、それに基づき課題とその解決の方向を見通す大局的な視野が何よりも大切である。このための基礎情報が、現地調査・観測や計算などによる詳細な土砂動態の検討から出てくることは言うまでもない。しかし、水系全体のスケールで見ると、土砂動態の特性が場所や粒径により非常に大きく変わるために、個別区間の詳細な検討を水系全体に積み上げたからといって、自動的に上記のような広い視野が得られるとは限らない。

このような技術面での課題を克服するために、土木研究所河川研究室は、土砂動態を極力きちんと把握しようとする努力と土砂管理方針策定との間をつなぐ“中間的な”情報集積・編集の場が必要と考え、具体的には、水系スケールでの土砂動態および管理の要点を見通すための「水系土砂動態マップ」の作成を提案している¹⁷⁾。

河川の水系を通る水と物質の流れは、流域を人体にたとえれば血流のようなものである。水系土砂動態マップは、国土の血流図の「土砂版」とも言え、水系における土砂の全体的な動きを簡潔に合理的な形で示すものである。マップ作成の一般的要諦は次の5点である。①水系内で一貫した表示法とする。②極力実測に基づき、わからない部分は無理に表示せず、「わからない」ことを表示する。③同じような挙動を示し、同じような働きを持つ粒径集団（有効粒径集団）ごとに分けて表示する。④その場所の河床材料と有意に混合しながら輸送されるか（混合型）、ほとんど混ざらずに輸送されるか（通過型）を分けて表示する。⑤土砂の生産源である上流流域を、流域の特徴把握にとっても流域管理の単位としても適切なスケールを持つサブ流域に分割する。

土砂管理方針策定だけがマップ作成の目的ではなく、現状の土砂動態把握の弱点を明らかにし、当該水系に合った調査・観測戦略を練ることもマップ作成の重要なねらいである。

(2) 水系土砂動態マップの事例紹介¹⁷⁾ 一 瀬沼川と江合川一

a) 瀬沼川

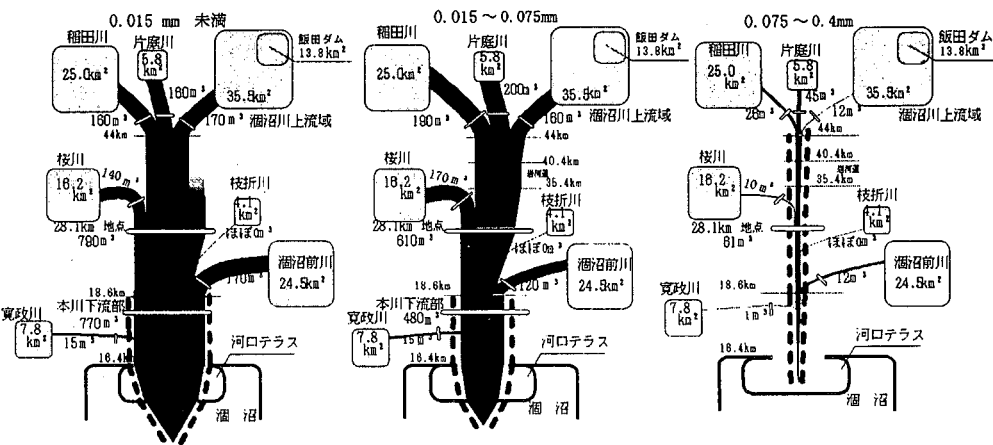


図-8 瀬沼川の土砂動態マップ（1998年9月16日洪水による総移動量）

1998年9月16日を中心とする1洪水の土砂移動総量について、瀬沼川水系内の土砂移動を包括的に描いたのが図-8に示す水系土砂動態マップである。河道の太さが土砂移動量を示している。この河道を跨ぐ白線は観測点であり、傍らに土砂通過量を示している。河床材料と交わりながら輸送される地点については（混合型：表-2 参照）、河道の横に点線を打った。サブ流域を表す四角内の数字は土砂生産源の面積である。また、動態の分からない地点については河道を破線表示とした。この図によると、サブ流域から供給される土砂量と、28.1km および本川下流部観測地点での土砂通過量の間では、1～2割の誤差があるものの、ほぼ収支が合う結果となっている。このことから、河川中流域での細粒土砂移動量は、各サブ流域からの供給土砂量を粒径別に水文学的に追跡すれば把握できると言える。ただし、洪水の規模が大きくなり、洪水が高水敷上を大量に流下する場合には、そこでの細粒土砂の堆積を“シンク”として考慮する必要があることもわかっている。

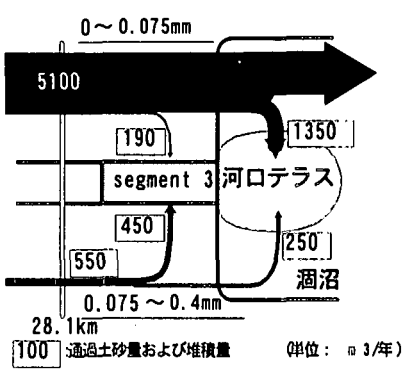


図-9 瀬沼川河口部の土砂動態マップ

瀬沼川と瀬沼をつなぐ河口付近の土砂動態は特に細粒土砂にとって重要なので、詳細図（年平均値）を図-9に示すように別途作った。図から、0.075～0.4mmの粒径集団については、ほぼ全量が河口域に堆積し、そこまでで完結した土砂収支を得ることができ、河口の底質条件を支配することがわかる。一方、0～0.075mmの粒径集団については、大半が河口テラスより沖の湖底へ堆積して瀬沼の底質環境を形づくり、もしくはさらに下流部に輸送されることがわかる。

ｂ) 江合川

得られた土砂動態マップを図-10に示す。図-11は、対象期間中に鳴子ダムに堆積した土砂がそのまま下流河道に供給されていたと仮想したマップである。表示法は瀬沼川の場合と同じである。これらの図から、まず、細粒の粒径集団 0.1mm 以下の移動量が他の集団に比べ大きいことがわかる。次に多いのが 0.1～2mmの粒径集団であり、これは、セグメント 2-2 においてのみ河床材料と交換するよう表示されている。図-10の実態では、この粒径集団の移動量がセグメント 2-2 区間において下流に行くほど増大している。このことは河床低下傾向を意味し、実際、この不均衡量（1.4万～3.6万 m³/年）と同区間での実測の河床低下量とは

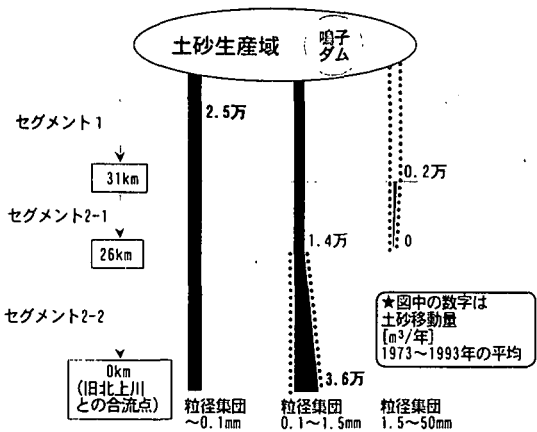


図-10 江合川土砂動態マップ

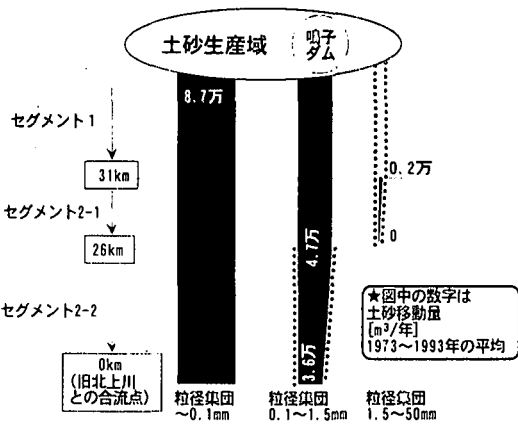


図-11 江合川仮想土砂動態マップ
（鳴子ダムからの土砂供給有）

オーダーが一致する。粒径集団 2~50mm は、少なくともマップ表示区間については、他の粒径集団に比べ圧倒的に移動量が小さく、セグメント 2-1 の下流端で止まっている。

図-11 の仮想マップ(鳴子ダムの土砂供給抑止効果 0 を仮想)と図-10 を比較すると、ダムの効果によって、左の 2 つの粒径集団の移動量が“痩せる”ことがわかる。2~50mm の粒径集団については、ダムの効果がマップ表示区間までとどいていないと推定される。また、粒径集団 0.1~2mm のセグメント 2-2 区間での移動量に着目すると、ダム効果無しの仮想状態では、上流の方が移動量が大きく、縦断形が全体的に少しずつ上昇する土砂バランスとなっている。このことは、鳴子ダム土砂供給抑止効果により、この粒径集団の供給量が絞られ、図-11 の状態から図-10 のように下流に向け移動量が増大する形になったこと、このためにセグメント 2-2 区間で河床低下が生じたことを示している。

(3) 土砂動態マップの利用と今後の展開について

以上のようなマップを描くことによって、サブ流域の土砂供給特性、平野部での流送土砂形態、河床材料との混合、堆積領域といった、水系全体での土砂動態を総合的に把握することができる。また、このマップを土台にして、次のような課題について全体を見通す議論が可能になると期待される。1) 例えば、あるサブ流域において自然的、人為的インパクトにより供給土砂の量や粒径が変化したが、下流部の地形や自然環境に及ぼす影響の短期、長期予測。2) 土砂に吸着して流下する物質について、輸送量・質・供給源・堆積域の推定と、それが水質や自然環境へ及ぼす影響評価。

ここで描かれているのは、土砂移動の一断面であり、同じ流域を対象にする場合でも、対象期間や時間・空間スケールを変えた種々のマップの作成により、土砂移動を多角的にとらえることもできる。さらに、海岸と合わせたマップを描くことにより、河川と海岸との流砂系におけるつながりと課題が明瞭になろう。対象流域固有の土砂動態とそれに関わる課題を把握するための基本情報として、水系土砂動態マップを描いてみようと思ふことが大切である。

7. 広域土砂動態制御に向けた調整の場のあり方について

第 1 章において 3 つ目の課題に言及しながら、管理の計画論を並行して議論すべきではないかと述べた。本章では、議論の材料とするため、土砂という 1 つの側面ではあるが、それを流域スケールという広域で管理するための計画論のたたき台を提示する。

(1) 対象する土砂の区分法

- 粒径をいくつかの塊に区切って考える→有効粒径集団ごとに土砂動態をとらえる。
- 区切る単位は、まず 3 つから：細粒土砂（粘土・シルト、細砂、微細砂）、砂、礫。
- 上記のどれを当該流域で選択するか（必ずしも全部選択する必要はない）、各粒径集団の粒径範囲を具体的にどう定めるか（Xmm~Ymm）は、以下のように、最終的にコントロールしたい土砂の種類、あるいは最終的にコントロールしたい場を構成する主材料を明確にし、調整した上で行う。

＜コントロールしたい場の観点から＞

海浜材料／海底材料？／沖積河道セグメント 1、2-1、2-2、3 の各河床主材料（材料 m）／河道高水敷構成材料（材料 s）／ダムに堆積した土砂の材料

＜コントロールしたい土砂の観点から＞

- ・物質輸送（たとえば汚濁物質、栄養塩など）：粘土・シルト
- ・河床表面を細粒土砂が被覆（植生繁茂や底質ハビタットを規定）：細砂～シルト
- ・細粒土砂堆積による干潟環境形成：細砂～シルト・粘土

(2)土砂通過量（フラックス）の規程の仕方

- a) 通常ベース（中小洪水＋平水）：「年間 Volume m^3 」：5～20 年間程度の総通過量を計算し年間通過量に直す。
- b) 大規模洪水ベース：1つの洪水での通過量「Volume m^3 」：特定の洪水を設定してシナリオ計算

(3)基準地点の設定：取り上げる粒径集団を基準地点ごとに設定

・沖積河川の最上流端（有力支川も含む）：沖積河道への供給／・河口：海（海浜）への供給／・場合によっては（河道延長が長いなど）、沖積河道のセグメント変化点で、基準点を設けることも検討／・基準点ごとの役割に応じて、不要な粒径集団を落としても構わない／・基準地点における対象粒径集団ごとの通過量を、計画策定の対象とする。

(4)基準地点における粒径集団ごとの通過量の見積もり（通常ベースのフラックスのみを対象）

・時期は、1)現在、2)大規模人為インパクト前（たとえば30年前）、3)現在の計画通り整備等が進んだ後（たとえば20年後）、の原則3時点／・基準地点で河床主材料（材料 m ）になっている粒径集団については、流砂量計算による推定がメイン。将来予測については、山地部を含む河床変動計算が必要となるが、これを常にやるべきかは要検討。／・基準地点で、通過型の（ウォッシュロード的に挙動する）粒径集団については、浮遊砂観測による $Q \sim Q_s$ 関係や、それに上流での各施設の影響をマクロに加味することを基本に行う。

・以上の結果を課題認識・整理の土台とする。→→基準地点で、どの粒径集団の通過量が、どれだけ減った、減る、増えた、増えるか？の把握。

(5)基準地点における粒径集団ごとの通過量の変化がもたらした／もたらしうる課題の把握（通常ベース）

・課題把握は、「コントロールしたい土砂の観点」「コントロールしたい場の観点」から行う／・ここで、という土砂がどれだけ必要か、どれだけ不要かの評価軸の設定、課題の深刻度の判断が行われる／・この際、上記2つの観点から評価するための尺度（価値）が（いずれ）必要になる。例：河床維持上のこれだけの土砂が必要。河川環境・海岸環境上これだけの土砂が必要。海岸保全上これだけの土砂が必要。逆に、これ以上の土砂は不要。……／・様々な角度からの問題の深刻度と土砂通過量との関係が、1つの机の上にはばらまかれ、一括して見ることができる状況をつくる。／・価値論としては、たとえば、1)昔に戻す、2)機能論（課題解決、新秩序）、3)様子見あるいは現状踏襲、4)少しやってみてチェック、などが考えられる。

(6)基準地点ごと粒径集団ごとに実現したい土砂フラックスの幅を設定（通常ベース）

これを基に実現可能性を吟味し、最終的な目標幅と達成方法を検討する。

(7)大規模洪水ベースへの対応

・原則として沖積河川上流端の基準地点のみを検討対象にする。／・治水上有害な土砂通過量を設定する。「この粒径集団は1洪水中にこの量以上来たら困る。この量以下なら OK」→粒径集団ごとの許容洪水時土砂量の設定。／・許容洪水時土砂量は、現状の $Q \sim Q_s$ 、 Q_b （通過型、混合型の両方の土砂）の X 倍で表すイメージ。／・許容 X の設定は、河床変動計算結果を活用し、河道における河床変動の許容度、計画において洪水中の河床変動をどこまで見込むかなどを総合吟味して行う。／・これを受けて許容通過量以下に抑える手だての検討（施設対応、非施設対応）を行う。／・手だての規模と X 値との関係から、最終判断を行う。／・この方策が通常ベースの計画とぶつからないかチェックし、必要に応じて調整する。

(8)計画項目のまとめ

・対象とする粒径集団／・基準地点とそこで対象とする粒径集団／・基準地点での計画土砂通過量（幅ないし上限値で設定）（通常ベースと大規模洪水ベース）／・計画土砂量を得るための対策と実行手順／・モニタリング方針と計画の定期見直しのスケジュール。／調査手法、予測手法の改良・開発へのアクション

8. おわりに

最初に述べたように、流砂系における広域土砂動態制御を実務レベルに根付かせるために大切なことは、広い場に通じる共通言語を持つこと（これは、完全な絵を膨大な時間と労力をかけて描かねばならないと言っているのではなく、粗くてもよいから全体を見通す絵を描いてみるという姿勢、そのために最低限の共通の表現法を持つことの重要性を強調している）、課題認識と管理目標を明確にすること、計画論を並行して検討することではないかと筆者は考えている。このことは個別分野の研究を過小評価することにはならない。上記3点を十分意識して個別分野の研究を全体とつなげる少しの努力を惜しまなければ、個別分野の研究蓄積やポテンシャルが本研究課題にも存分に生かされるのではないかと思う。有効粒径集団の動態と対応する現象、課題との関連分析などは個別分野のつまこんだ研究無くしてはあり得ない。“想像力”も駆使して個別分野で起こりうる課題を徹底的に洗い出した上で、多少荒っぽくてもよいから、その成果を水系土砂動態マップや管理計画論に乗せて考えてみるという姿勢が大事なのではないか。

参考文献

- 1) 藤田光一：河床材料の見方，土木技術資料，第40巻，12号，1998。
- 2) 山本晃一：沖積河川学，山海堂，pp.1-16，1994。
- 3) 建設省河川局監修，日本河川協会編：改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説(調査編)，山海堂，9章，14章，1997。
- 4) 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面の形成機構と縦断面変化予測，土木学会論文集，No.600/Ⅱ-44，pp.37-50，1998。
- 5) 李参照，山本晃一ほか：扇状地礫床河道における安定植生域の形成機構に関する研究，土木研究所資料，第3622号，1999。
- 6) 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，土木学会水工学論文集，第42巻，pp.433-438，1998。
- 7) 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。
- 8) 宇多高明，望月達也，藤田光一ほか：洪水流を受けた時の多自然型河岸防衛工・粘性土・植生の挙動－洪水に対する安定性・耐侵食性を判断するために－，土木研究所資料，第3489号，1997。
- 9) 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面の形成機構と縦断面変化予測，土木学会論文集，No.600/Ⅱ-44，pp.37-50，1998。
- 10) 芦田和男，奥村武信：ダム堆砂に関する研究，京都大学防災研究所年報，第17号B，pp.555-570，1974。
- 11) 土木学会水理委員会：水理公式集，土木学会，第2編「河川編」，1999。
- 12) 山本晃一，藤田光一，赤堀安宏，太田知章：沖積河道縦断面の形成機構に関する研究，土木研究所資料，第3164号，1993。
- 13) Parker, G.: Gravel-bed channel instability, Issues and Directions in Hydraulics, Nakato & Ettema (eds), Balkema, Rotterdam, pp.115-133, 1996.
- 14) Parker, G. and Y. Cui: The arrested gravel front: stable gravel-sand transitions in rivers, Part 1: Simplified analytical solution, J. Hydraulic Research, Vol.36, No.1, pp.75-100, 1998.
- 15) Cui, Y. and G. Parker: The arrested gravel front: stable gravel-sand transitions in rivers, Part 2: General numerical solution, J. Hydraulic Research, Vol.36, No.2, pp.159-182, 1998.
- 16) 江頭進治，金海生，竹林洋史ほか：木津川下流域の河床変動と土砂収支，土木学会水工学論文集，第44巻，pp.777-782，2000。
- 17) 藤田光一，平鍋治ほか，水系土砂動態マップの作成と利用－瀬沼川と江合川の事例から－，土木技術資料，Vol.41，No.7，1999。
- 18) 藤田光一：“広域総合土砂（物質）管理”の理念と実践の隔たりをどう埋めるか，月刊地球，海洋出版（株），2000。