

2015 年度（第 51 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 15-A-1

流域土砂管理における問題点と 防災と環境の両立

京都大学 教授

藤田正治

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2015 年 8 月

流域土砂管理における問題点と防災と環境の両立

Problems on Sediment Management in River Basins and Compatibility of Disaster Mitigation and Environmental Issues

藤 田 正 治

Masaharu FUJITA

1. はじめに

河川審議会総合土砂管理小委員会が平成 10 年に「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」を報告してから約 17 年が経過し、相模川、安倍川、矢作川などでは国土交通省の委員会で土砂管理に向けた議論が進められている¹⁾。議論の中心は、土砂災害からの流域の安全の確保、河川環境の保全、土砂の有効利用をいかにバランスよく達成するかということであるが、これらの目的の制約や曖昧さのために事業の実施が困難になる場合も多い。(社)土木学会でも、「貯水池の土砂管理」や「置き土による土砂還元」について現状と問題点を議論してきた^{2,3)}。これまで河川を流れる水については、洪水対策と水資源開発、水質管理が着実に進められてきているのに対し、同じく河川を流れる土砂に対する管理は思うように実施されていないのが現状である。わが国の主要河川では土砂供給量が減少し、河床低下や河川環境の悪化を招いているところが少なくない⁴⁾。一方、深層崩壊や広範囲に及ぶ表層崩壊により流域内で多量の土砂が生産され、過剰土砂供給に悩まされている河川も多い。このような実態を鑑みると、早急に総合的土砂管理の技術開発を進展させ、速やかに適切な土砂管理事業を実施することが必要であろう。

総合的土砂管理に関する技術開発が進展しない理由は、上記の土砂管理の 3 つの目的に対する具体策が互いに相反する場合が多いことであると考えられる。しかし、相反する具体策の正と負の効果を適切に予測し評価する手法が確立されていれば、総合的判断からこの問題が解決されるかもしれないが、とくに環境面での手法がないために総合的な議論が進まない。たとえば、「貯水池に土砂を貯めずに下流に流す」を土砂管理の理念としても、環境面での流砂の質と量の適正值を決めることが難しい。また、下流域に土砂を供給することで河床上昇が起こると予測されると、現在の治水の考え方では河床上昇を許容することは難しく、土砂の供給量を少なくせざるを得ない。環境面での正の効果を明確に示すことができれば、治水面での負の効果もあるものの総合的に「貯水池に土砂を貯めずに下流に流す」という理念が受け入れられるかもしれない。しかし、現状では、土砂管理において治水安全度を維持するような考えにならざるを得ず、環境のために積極的に土砂を利用するような理念を明確に設定することが難しい。安全面と環境面での流砂の適正量を総合的に決めることができれば、より適切な土砂管理の具体的な手法が提案しやすくなるものと思われる。

土砂災害が多いわが国においても、わが国の主要な河川は河床低下の傾向にあり海岸侵食も各地で進行している⁴⁾。ことを考えると、流域全体で土砂動態のバランスが崩れているといえる。これは、河川を流れる土砂を資源として見た時、資源不足であることを意味する。これには高度経済成長期に活発行われた砂利採取やダム建設などが影響していると考えられるが、荒廃し禿山の目立った山地を治山事業や砂防事業により緑豊かな山林に整備したことも関係している。流砂量の減少、河床低下、およびそれに伴う河床材料の粗粒化は河川生態系にも影響を及ぼしている。したがって、人間だけでなく生物の視点からでも土砂資源不足となっている。海外に目を向けると、インドネシアやフィリピンなどの活火山地域では、噴火による土砂は貴重な資源として建設材料に使われているが、過度な砂利採取が流域の安全や環境に悪影響を与えているところもある。それぞれの国の社会経済的な状況を考えながら、流域の安全や環境に負荷をかけないようにするための適切な土砂管理の必要性が感じられる。

しかし、これまで土砂を資源として管理するようなことは行ってこなかった。土砂の資源利用である砂利採取はわが国では管理されているが、これは治水上問題となる河道堆積土砂を除去するのが目的であるので、積極的な資源利用とは言い難い。河川水の場合、貯水池で洪水調節し、貯留した水を水資源として使うという洪水対策と水資源開発が連動して行われているが、土砂の場合、土砂資源開発という言葉も聞かれないし、災害対策と資源管理が連動していることもない。本稿では、以上のような背景を考えながら、流域土砂管理の問題点を指摘し、土砂資源の観点の必要性を述べながら、防災と環境が両立する流域土砂管理の基本的な考え方、また実例をもとに具体的な考え方について述べたい。

2. 流域土砂管理の問題点

2.1 理念形成の問題

総合的土砂管理では、安全、環境、利用という異なる軸の目的を達成する必要があるので、対象流域での土砂管理の理念を作ることが重要である。理念を決めるとき、3つの目的に対する具体策は一般的に相反的なものである。対象流域の特徴を考えながら3つの目的を総合的に考える必要がある。その際、次のような問題を解決しなければならないと考えられる。

まず、流域の安全は最優先すべき事項かもしれない。河床上昇につながるような土砂管理は治水安全度を下げるので、河床上昇しないような方法を考えることが多い。しかし、これが制約条件となって環境改善の目的が十分達成できなくなる場合もある。たとえば、ダムの下流域で流砂量の減少、とくに砂礫成分の減少により生物生息場の物理環境の悪化が顕著な場合、その改善のために適切な粒径の流砂量を増やす必要があり、その方法として貯水池に堆積した土砂をダムの下流に流すことが検討される。しかし、流砂量が少なくなった河川に多量の土砂を供給すると河床上昇するので、河床を上昇させないという制約により土砂供給量も制限をうけ、結果として生息場の物理環境の改善につながらないかもしれない。また、環境保全の面からも、大幅な物理環境の変化は望ましくないという考えもあり、供給土砂量が制限されてしまうこともある。このような問題に対する解決策を見つけることは難しいが、選択肢を広げるために、維持すべき河床高の考え方を変える必要があると思われる。すなわち、河床高を極力変化させないという考えでは制約条件が厳しいので、維持すべき河床高にある変動幅を与えて許容するという考え方の導入である。河床上昇または河床低下の一方方向の変化はもちろん好ましくないが、治水の点から河床高にある変動幅を許容すれば、安全面の制約条件が緩和され、環境面で色々なアイデアが生まれてくるものと思われる。一つの共通理念として、「流砂を活性化させ河床変動幅をある程度許容する土砂管理」のようなものである。

このような理念を掲げるとき、具体的な土砂管理手法に結びつけるためには解決すべきことが多く残されている。具体策作成時の技術的・学術的問題、土砂管理実施上の問題など多岐にわたるが、次にそれについて述べたい。

2.2 技術的・学術的問題

(1) 河床変動モデル

安全面で河床高をある範囲に収める必要があるので、土砂管理の具体策によって生じる河床変動の予測が必須である。現在の技術では、河床条件、土砂供給条件と水理条件が与えられれば河床変動計算により比較的精度よく予測できるので、適正な土砂供給量を具体的に設定することができる。河床変動モデルはこのような安全面での予測に用いられるのが通常であるが、生息場物理環境の変化の予測に応用できれば、環境面での変化予測も行える。河床変動モデルから得ることが可能な物理環境量としては、河床高、河床材料の粒度分布、流砂量とその粒度分布、地下水位、河床材料の空隙率などが挙げられるので、これらの物理量の解析が可能なモデルの開発が必要である。

安全と環境の両面からの土砂管理が必要な典型的な例として、ダム下流で河床材料の粗粒化が進み生息場物理環境改善策として下流に土砂を人為的に供給する場合を考える。粗粒化した河床表層の空隙率は大きくなっていると

考えられるが、そこに砂礫を供給すると空隙率の変化が河床変動を吸収するような現象が発生する。従来の河床変動解析は空隙率を一定としたものがほとんどであるので、このような現象を表すことができない。たとえば、流量一定の水路に移動しない粗礫を敷き、そこに細砂を供給すると細砂が空隙を埋めながら空隙の間を通過して流れる。給砂量が大きいと細砂の堆積層が粗礫層の上に形成されるが、給砂量が少ないと礫間を流れる。これを空隙率一定の河床変動モデルで計算すると、必ず河床上昇し実現象と異なる結果を得る。河床上昇の有無は安全面での議論を左右する重要な情報であるので、以上の点を改善し、空隙率の変化を考慮した河床変動解析を行えるようにしなければならない。

図-1 は、堤・藤田・Sulaiman⁵⁾が対数正規分布で表される粒度分布の球を容器に充填する数値モデルを開発し、その空隙率を対数正規分布の標準偏差をパラメータとして求めた結果である。藤田・Sulaiman・Ikhsan⁶⁾、岩見・細見⁷⁾は空隙率の変化を考慮した河床変動モデルに図-1 のような関係を導入した一次元河床変動モデルを提案している。河床材料の空隙は生物生息場の一つであり、地下水の流動にも関係するので、空隙率の変化の解析は生物生息場の問題への応用が期待される。

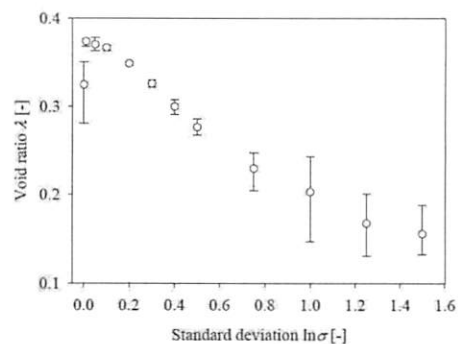


図-1 対数正規分布の河床材料の空隙率⁵⁾
(標準偏差と空隙率の関係)

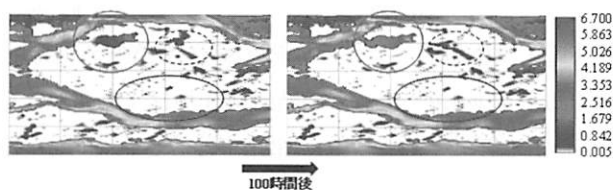


図-2 止水域の時間的变化 (水深の平面分布)

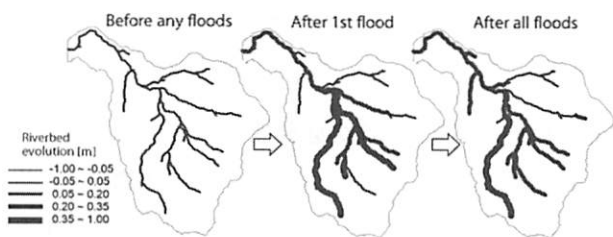


図-3 土砂生産流出モデルを用いた計算例¹²⁾

最近、2次元河床変動計算モデルの生息場物理環境の問題への応用が進められている。河道内にはワンドやたまりなどと呼ばれる流速が非常に緩やかな場所がある。これも生物の生息場の一つであり、このような止水域の動態について、著者らは網状流路において非常給水条件で砂州の計算に地下水を考慮することで解析した。解析方法については参考文献⁸⁾を参照されたい。図-2 は流量が増加したときの水深の平面分布の変化を計算した結果の一例で、流量が小流量から大流量に転じた場合の止水域の変化は大きく分けて、①本流との合流する、②止水域が移動する、③変化しない、の3つに大別された。①は表面流として止水域に水が流れ込むため、水位の変化が最も大きい。②も止水域形状の変化があるが、浸透流としての水の移動による変化であるため、比較的小規模な変化である。③については、水位の変化が大きい水域(流路)から離れた場所に位置しており、目立った変化が現れない領域である。生息場を評価する上では、このような止水域の特徴の違いも重要であると考えられる。

(2) 土砂動態モデル

総合的土砂管理の具体策を考える上で山地から海岸までの土砂動態モデルは基本的なツールであり、これを用いた短期・長期土砂流出予測が具体的な管理手法を決めるために必要である。これまでに、高橋・井上⁹⁾、江頭・松木¹⁰⁾、砂田・長谷川¹¹⁾などが提案している。ただし、土砂資源管理を考えると、資源の生成に当たる土砂生産および土砂供給の量とタイミングを適切に考慮できるモデルが必要である。従来のモデルは土砂生産と土砂供給に関しては考慮されていないか統計的な手法で扱っており、この点が十分でないと考えられる。

山野井・藤田¹²⁾は、凍結融解作用による通常時の土砂生産過程とその後の土砂供給過程を考慮した土砂動態モデルを構築している。彼らは土砂生産流出過程を3過程、すなわち斜面での土砂生産過程、河道への土砂供給過程、

河道内の土砂輸送堆積過程からなるとし、土砂生産過程には泉山・堤・藤田¹³⁾の凍結融解土砂生産モデルおよび芦田・高橋・澤田¹⁴⁾によるガリー侵食深モデル、土砂供給過程には新たな崖錐堆積物の侵食モデル、土砂輸送堆積過程については江頭・松木モデル¹⁰⁾を用いた。泉山らの土砂生産モデルは地中温度分布の計算に基づく風化基岩の凍結融解による土砂化深度を求めるモデルであり、地質毎に凍結融解が起こる秋から春の期間の土砂生産量を求めるものである。生産土砂は斜面裾やガリー壁面裾に崖錐として堆積し、流水幅だけ侵食されるとする崖錐の消長モデルに基づき土砂供給量を算定している。土砂輸送堆積モデルは、江頭・松木の単位河道・単位斜面に対する土砂の輸送堆積モデルを用いている。図-3はこのモデルによる結果の一例を示したものである。洪水前（左）、凍結融解作用による生産土砂が崖錐を成長させる段階で、河道には土砂が堆積していない。一洪水経験すると（中）、崖錐が侵食され土砂が河道に供給され輸送されるが、河道には土砂が堆積している。洪水をいくつか経験することで（右）、土砂が徐々に下流に流送されている。

土砂災害・水害対策の観点では、生産土砂の流域での堆積分布の情報が必要であり、流域内のトラブルスポットを見つけることができ、土砂資源の観点からは、資源の生成と流域での分配、流域外への消失の状況が把握できるような土砂動態モデルの開発が必要である。

(3) ハビタットロジー学の必要性

環境保全の点において、望ましい河川生物の生息場物理環境を明確にする必要がある。とくに、良好な生息場になるための河床形状、河床材料の粒度分布、流砂量とその粒度分布、地下水位、河床材料の空隙率などの物理環境の条件がわかれば、(2)で述べた解析モデルを使って具体的な流水や流砂の条件を見つけることができ、土砂管理の具体策を提示することができる。しかし、この点の研究がまだ十分でなく、これらの条件を決めることが難しいのが現状である。また、河床変動幅を許容する土砂管理では、物理環境も変動することになり、生物にとって望ましい動的な物理環境条件も明らかにしなければならない。

この点に関して、竹門¹⁵⁾が提唱しているハビタットロジー（生息場学）の進展が望まれる。ハビタットロジーとは生息場の構造と維持のしくみを明らかにする科学のことで、生物学、生態学、水理学、水文学、土砂水理学、地形学などの融合を目指す新たな学問である。竹門らは木津川を対象として「河川環境のための河床地形管理手法に関する技術開発」¹⁶⁾を行い、ハビタットロジーの観点から有用な知見を得ている。たとえば、砂州の比高とワンド個数の関係を調査しているが、この結果と2次元河床変動計算により、ワンドを保全するための水理条件、土砂供給条件を求めることができる。また、この研究の中で鮎の生息に適した流送土砂量も求めている。このような研究の蓄積がハビタットロジーを進展させ、環境保全・復元の面での土砂管理策の評価を可能にする。

野村・竹門ら¹⁷⁾は、山地溪流の階段状河床に存在する様々なマイクロハビタットの種類と場所および生息する水生昆虫の種と数を調査した。鈴木・藤田ら¹⁸⁾は土砂水理学的に階段状河床形を描画するモデルを作成し、野村・竹門の生息場調査の結果を使って、描画した階段状河床形に水生昆虫の生息場を記載する手法を提案した。図-4はその一例を示したもので、上図がシミュレーション結果、下図が調査結果である。この研究は、水理条件や土砂供給条件の変化により、山地溪流の生息場がどのように変化するかを知るうえで役立つ。このような生息場モデルが土砂管理の具体策の環境保全・復元に対する効果を評価するうえで必要である。

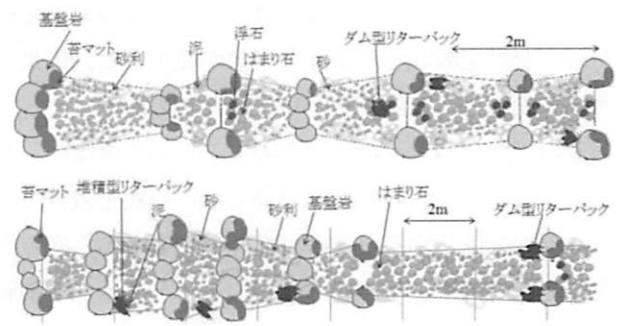


図-4 階段状河床形とマイクロハビタット分布
(上図：シミュレーション，下図：現地調査)

2.3 土砂管理実施上の問題

土砂管理の理念が設定され、それを達成する具体策を立案するための様々なモデルが完成したとし、つぎに実施

可能な土砂管理計画を立てるときの問題について考える。まず、土砂生産特性に係ることについて述べたい。土砂生産にはいろいろな形態があるが、斜面侵食と崩壊がその代表である。通常の土砂生産は裸地斜面の侵食により、その場所はほぼ特定できその量も大まかには予測できる。しかし、崩壊は局所的で、発生地点や規模を予測することは難しい。したがって、土砂管理の観点から見れば、斜面侵食による土砂の管理計画は立てやすいが、崩壊による土砂の管理計画は立てにくいと言える。侵食による土砂生産はその流域の土砂生産の通常のポテンシャルを表すものであり、土砂災害を引き起こすような表層崩壊や深層崩壊による土砂生産は通常のポテンシャルに時々付け加えられる変動成分としてとらえることができるが、この変動成分は侵食による値よりかなり大きい。流域の土砂管理において、対象とする流域がどのような土砂生産特性を有しているのかを知ることが基本的な事項であるが、崩壊による生産土砂量と分布をいかに与えるかは重要な問題である。

深層崩壊や広域的な表層崩壊などによる大規模土砂災害の発生は非常に稀であるが、一度発生すると流域に大きな影響を与える。しかし、これを予想して土砂管理計画に入れることは非常に難しい。むしろ大規模土砂災害の後に新たな土砂管理計画が立てられ、次の大規模土砂災害が発生するまでそれを継続するような考え方のほうが現実的である。大規模土砂災害後の緊急対策とその後の流域の状態を予想して、長期的な視点からその流域に応じた土砂管理を行うことが肝要である。

つぎに、社会・経済的な側面の問題に係ることである。たとえば、貯水池に堆積した土砂を生息場物理環境の回復のために下流に流すことを計画したとしても、下流で河床上昇が大きくなれば、余分な土砂は土捨て場に運搬し廃棄しなければならない。また、多数の深層崩壊が発生した流域では河床上昇による治水安全度の低下が問題になり、緊急除石が必要になる。貯水池があればその堆砂は深刻で、緊急対策が必要になる。これに対する第一の対策は堆積土砂を除去することであるが、土砂災害が生じるような山地部に大量の土砂を廃棄するような場所を見つけることは実際上容易でなく、長距離輸送するにも費用や環境の面が問題になり実行できないことが多い。災害後の洪水対策として河道の通水断面を確保するために除石などを緊急的に行っているが、一洪水で元の状態に戻ることもしばしばである。安価に土砂を輸送するためには流水の力を使うのがよい。しかし、流域には拡幅部などの土砂が堆積しやすい場所があり、土砂管理上のトラブルスポットになる。河床変動幅を考慮して土砂供給量を調整しても、このようなトラブルスポットでは除石などによる管理が必要になる。このように、土砂管理においては除石などの人的処理が必ず必要になる。これが社会・経済的に可能かどうかは土砂管理事業の実施において重要な要素である。現在は、除石した土砂を建設材料や地域の土地造成など、資源として利用しているところもある。しかし、一般に、下流域では上流からの土砂の供給は望まない場合が多いし、上流域でも堆積土砂の処理に四苦八苦している。このような状況の中で難しいかもしれないが、土砂の資源的価値を見直し積極的に有効利用する意識が高まれば、土砂を下流に流すことが受け入れられ、上流域での有効利用も進み、土砂管理の具体策の選択に幅ができる。

3. 総合的土砂管理における土砂資源の観点

3.1 水と土砂の比較

河川の水と土砂を比較すると多くの共通点がある。流量と流砂量、水面と河床位、洪水災害と土砂災害、人口洪水と排砂などである。しかし、水の場合、洪水対策と水資源開発を両輪として河川技術が発達し、着実に両者が実施されている。たとえば、貯水池事業はその典型的な例である。一方、土砂について見ると、どうであろうか。土砂災害対策は行っているが、土砂資源開発は耳慣れない言葉である。両者の違いについて考えると、水の資源的価値は確固たるものがあるが、土砂の資源的価値は不明確で認知されていないというところに行き着く。そこで、つぎに土砂の資源的価値について考えてみよう。

3.2 土砂の資源的価値

土砂は斜面崩壊や土石流などの現象を通して災害をもたらす半面、流域の資源の一つとして重要である。たとえば、土砂は国土形成や農地形成などにおいてその根源となるものであるし、わが国では規制されているが建設材料としても使われている。かつて黒部川扇状地では流水客土といって、漏水の激しい砂質土からなる田んぼに粘土を含む泥水を流して、田んぼの土を改良していた。流域の土砂を資源として活用していた一例である。また、土砂は様々な水生生物の生息場を形成している構成要素であり、生態系の中で重要な役割を果たしている。

現在行われている流域の土砂管理の多くは、治水・利水施設の元の機能を維持するために悪影響を与えている土砂を除去処理しようとするものであり、砂利採取を除けば新たな収入やプラス効果を生むという考えはほとんどない。土砂の量が少なければ問題はないが、大規模土砂災害後のように河道堆積土砂量が著しく大きくなると莫大な費用がかかる。負の財産を処理するというような土砂管理の発想では流域の様々な利害関係者のコンセンサスを得ることは難しく、積極的に土砂管理事業を実施することができない。なかなか進まない堆積土砂の処理は災害の復旧復興の足かせになり、また、流域の安全や環境に関係する大きな社会問題となる場合が多い。しかし、もしも土砂の資源的価値が高まれば土砂を処理するだけでなく利用する事業が生まれ、収入やプラス効果を生むものとして流域の利害関係者にも土砂管理事業が評価される。流域の土砂管理が円滑に進展するポイントとして、負のイメージが強い土砂に正のイメージを与えることであると思われる。

土砂は水とともに河川を流下するものであり、水と同様に貴重な資源であると考えるところから始めると円滑に進まない土砂管理の問題点の解決策が見つかるかもしれない。土砂は災害や濁水の原因としてマイナスのイメージが大きい。濁水の問題になるような微細な粒子から土石流で運ばれるような石礫まで、流砂系の中では河川環境の土台をつくる重要な構成要素であることに間違いはない。土砂資源という建設材料、農地や宅地、堤防の造成材料が頭に浮かぶが、水量、水質と同様に流砂量とその粒度分布は河川や海岸の自然環境の基盤を築いている重要な資源であるといえる。流砂のない川の自然環境を見ればその資源的価値の大きさが計り知れる。流砂系の総合的土砂管理においては環境保全も目的の一つとして挙げられているが、それはまさにこの点のことである。生物の生息場を構成する土砂は重要な資源であり、生態系サービスを享受している人間はこのような生物に対する土砂の資源的価値を忘れてはならない。

以上のように、土砂の新たな利用や生物の生息場に対する流砂の役割を考え、建設材料以外の土砂の資源的価値を見つけておくことが流域の土砂管理を円滑に行う上で重要であると考えられる。もしこれが見つかれば、大規模崩壊土砂災害後、負のイメージの多量の土砂を処理するのではなく、資源的価値の高い土砂資源が多量に供給されたと考えれば、いろいろな発想で土砂管理が進むものと考えられる。

4. 防災と環境保全の両立に向けて

4.1 土砂管理の考え方

土砂生産・流出に関して、安全、環境保全、土砂の有効利用の視点から流域一貫して土砂を管理するのが流砂系の総合的土砂管理であるが、ここには、土砂災害の対策だけでなく、流域における土砂のアンバランスを土砂利用によって解消し、流砂環境も保全しようとする狙いがある。ここで後者は土砂の資源的利用という観点から見ることができ、土砂資源管理という言葉で置き換えることができる。すなわち、総合的土砂管理は土砂災害対策と土砂資源管理の両方を含んでいる。土砂災害対策と土砂資源管理はそれぞれ別の目的で行われているが、土砂災害の起因となる表層崩壊や深層崩壊は土砂資源を生産する一現象であるので、土砂災害対策と土砂資源管理は一体として行うのが好ましい。また、森林伐採が進むと土砂流出量が多くなり土砂資源が豊富になるが、土砂生産現象を抑制、制御すると土砂資源量は減少することからも一体管理の必要性が伺える。

土砂災害の対策は想定外力の頻度とその時のハザードの場所と規模に対して行われ、土砂資源管理においては、河川への供給土砂量と河川（河川生態系）が必要とする土砂量（河川要求土砂量と定義する）がバランスするような施策が計画される。もしも供給土砂量が河川要求土砂量より多ければ、山地域での土砂生産を抑制するか、砂防

ダムなどで流砂を河道に貯めるか、人為的に河床土砂を河道外に持ち出す必要がある。要求土砂量が多い場合はその河川は土砂不足という意味であり、資源的観点からはその供給土砂量に見合った河川になるように改修するか、流域外の余った土砂を運び込むしかない。

土砂供給量は一般に年変動し、そのパターンは流域によって異なる。また、河川の要求土砂量も現在の流砂環境や河川の利用の仕方などによって異なる。図-5 は土砂供給量の年変動の典型的なパターンを示したものである。点線は河川が治水・利水上、環境上要求する土砂量を表す。Case 1

は河川要求土砂量と土砂供給量がほぼ釣り合った状況で長期変動しているパターンで、新たな土砂管理をする必要はほとんどない。Case 2 は土砂供給量が河川要求土砂量より常に大きい河川である。森林伐採が進んだ地域や火山噴火が頻繁に発生する地域などの河川がこれに当たる。Case 3 は通常は土砂供給量が河川要求土砂量より少なく、貧流砂環境にあるが、時々崩壊や噴火によって河川要求土砂量以上の土砂が供給されるような河川である。Case 4 はCase 3 と同様であるが、深層崩壊や山体崩壊などにより大規模な土砂生産が稀に起こり、その時に過剰な土砂が供給されるような河川である。わが国の河床低下が進行している河川では、Case 3, 4 このような状況が多いのではないと思われる。土砂資源の観点から各ケースを見ると、Case 3 や4 は土砂資源不足の河川に崩壊により土砂が供給され、水不足が豪雨により解消されるように土砂資源が回復することになる。

土砂管理手法を具体的に考えるとき、重要となるポイントは下記のようなものである。

- ① 安全、利用、環境の点での総合的に問題が解決されるか
- ② 管理手法に持続性があるか
- ③ 流域の利害関係者のコンセンサスが得られるか
- ④ 財政的なバランスがとれるか

以上のポイントについて、まず、安全と利用、環境保全の点を総合的に考慮した河川要求土砂量が設定できるかということと、供給土砂量をその要求土砂量に制御できるかという技術的課題がまず解決されなければならない。河川要求土砂量については、安全や利用に関しては河床変動計算等を用いて設定することは可能であるが、環境の面での要求土砂量を決めることは難しいのが現状であることはすでに述べた。これは河川生物の生息場における流砂の役割が十分わかっていないためである。しかし、ハビタットロジーの進展や河床変動解析法の高度化により、近い将来、この問題は解決できると思われる。一方供給土砂量や流砂量を制御するいくつかの技術はすでに利用することができる。砂防ダムでの貯留、砂防ダムのスリット化による土砂の供給、貯水池での排砂や置き土による土砂の供給などであり、これらが土砂管理のハード的なツールとなる。

土砂の制御ができたとしても過剰な土砂は河道外に排除するか、貯留する必要がある。山地域での土地造成や砂利採取には限度があり、持続性のある事業とは言いがたい。新たな土砂資源としての有効利用による収益や貯留した土砂の河川への還元による山地域外への土砂の輸送などを考え、財政的なバランスも考えた土砂管理が必要である。わが国ではCase 3 や4 のように土砂供給量が通常は小さく、時々過剰になりその変化が非常に大きいのが特徴である。この過剰供給はある意味では、不足する供給土砂量を回復するイベントであるといえる。このアンバランスの解消と財政的なバランスを考えることが土砂管理において重要である。

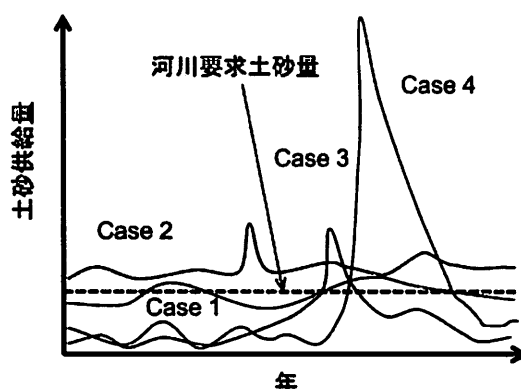


図-5 土砂供給量の変動のパターン

4.2 土砂災害対策と土砂資源管理の連携

総合的土砂管理は土砂災害対策と土砂資源管理の両面を持ち、後者は利用と環境保全の側面を持つ。図-6 は両

者が安全、利用、環境という面でお互いに関連し合っていることを示した図である。

土砂災害対策は治山や砂防、河道整備などのよって行われ、濁水対策もその一つである。これらを土砂資源管理の点からみると、資源量を減少させ、資源輸送を妨げていると言える。したがって、土砂災害対策は土砂資源利用に大きな影響を与えている。また、土砂資源利用として代表的な砂利採取はわが国では規制されているので現在は問題ないが、かつては過剰に取りすぎて河床低下を引き起こした。写真-1 に示すインドネシアのメラピ火山地域では、砂利の過剰採取により河床低下や流域の荒廃を招いている。河床低下は堤防や橋脚などの安定に影響を与え、河川の治水安全度を下げる。したがって、土砂資源管理が不適切であると土砂災害対策が必要になる。一方、火山噴火や深層崩壊発生後の緊急除石は緊急災害対策として有効であり、インドネシアのメラピ火山地域ではその土砂が建設材料としても使われている。このように土砂災害対策と土砂資源管理はお互いに関係し合っており、一体として事業を進めるべきである。

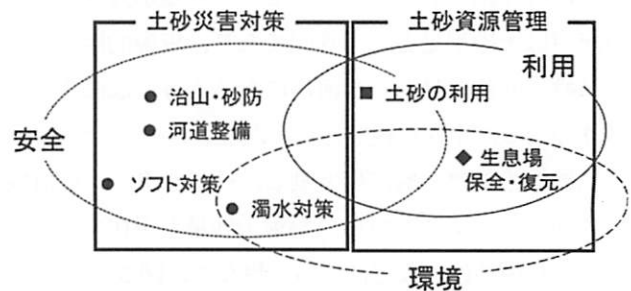


図-6 土砂災害対策と土砂資源管理



写真-1 インドネシア・メラピ火山地域の砂利採取

大規模災害後の流域に多量の土砂が堆積している状況では、二次災害を防止軽減するために土砂の除去を行う必要があるが、単に除去するだけの方策は予算や土捨て場、運送費用のことなどを考えると実現性が難しい場合も多い。そのとき、土砂資源活用というカードを持っていれば、除去が可能になるかもしれない。また、災害前、土砂資源不足の状態であれば、それを補うことができ環境保全・復元などが実施できるとともに、土砂災害の防止にもつながる。

4.3 大規模土砂災害後の土砂管理

(1) 概要

深層崩壊や広範囲に表層崩壊が発生すると極めて多量の土砂が流域に残留し、土砂流出や河床変動による二次災害の発生の危険性が長期間続く。貯水池では、堆砂の急速な進行、上流域の河床上昇に伴う洪水氾濫の危険性の増加などが懸念される。河道に数mから十数mの土砂が堆積することも稀ではなく、これが被災地の復旧・復興の障害になる。過剰に生産された土砂が流域に与える影響は大きく長く続くので、土砂管理計画はこの時を初期条件として考えるのが適切である。

さて、大規模土砂災害後の流域の土砂管理を行う場合、災害前の流域の持つ土砂動態の特性を十分把握した上で、生産された多量の土砂の処理を考えることが重要である。なぜなら、すでにその流域に土砂利用、環境保全の面で問題があれば、それを解決する手段として災害時に生産された土砂の利用を考えることができるからである。たとえば、急速に進む貯水池堆砂の対策として排砂を行うことで、顕在化していたダム下流域の河床低下が改善される。また、ダムによる流砂の減少で影響を受けた河川生物の生息場物理環境の改善が期待できるようであれば、土砂資源の活用として排砂を推進すべきである。また、災害前、ダムの下流のある区間で土砂が堆積傾向にあるような場合、すぐに排砂を行うと河床上昇を促進させてしまうので現在は排砂できる状態でないが、将来は侵食傾向に変わると予測されるようであれば、そのタイミングまでは上流域での砂防工事と除石で堆砂を軽減し、排砂できるような状況になってから排砂するという考え方もできる。このように、土砂管理手法は、過去から現在までの土砂動態

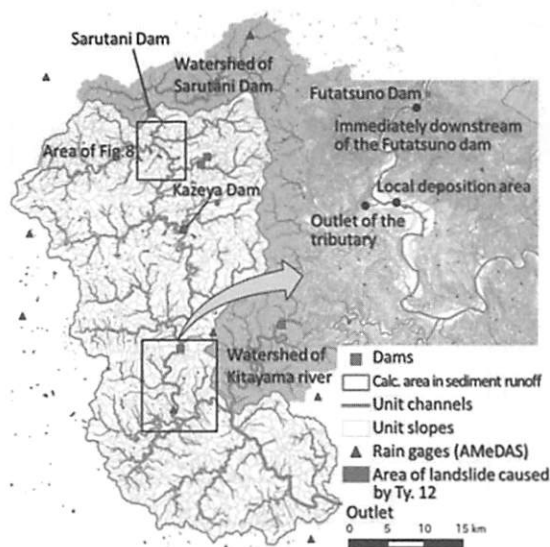


図-7 熊野川流域



写真-2 赤谷の深層崩壊と天然ダム



写真-3 河道の状況

(a) 支川の土砂堆積 (b) 本川の土砂堆積 (c) 二津野ダムの直下流 (d) 二津野ダム下流の土砂堆積

の状況を見ながら土砂動態の予測を行って、具体的な案を選択すべきである。そこで、このような考え方について熊野川流域を例に挙げて述べる。

(2) 熊野川の概要と紀伊半島大水害

2011年9月に台風12号により発生した紀伊半島大水害では、和歌山県と奈良県で合わせて深層崩壊等により約1億 m^3 の土砂が生産され、熊野川流域では多量の土砂の堆積とその処理の問題が重要な課題となっている。熊野川流域ではこの台風12号の来襲以前から、貯水池における堆砂やダム下流では河床低下等が生じており、問題解決のための適切な貯水池土砂管理の推進が急務となっていた。そこに大規模な土砂生産が発生したことで、さらに問題が深刻化している。図-7は熊野川流域を示したもので、上流から天ノ川、十津川と名称を変え、北山川を合流して熊野川として新宮市に注ぐ。奈良県内は比較的急峻で本川には猿谷ダム、風屋ダム、二津野ダムなどの多目的ダムや発電ダムがあり、和歌山県内に入ると川幅が広くなり、二津野ダム下流の本宮地区では土砂が継続的に堆積している。

台風12号は、紀伊半島南部の広い地域に総雨量1000mmから1500mm、上北山村では5日間で2436mmという異常豪雨をもたらした。その結果、表層崩壊や土石流だけでなく、30余の深層崩壊や大規模崩壊が発生した。写真-2は五條市大塔町赤谷で発生した深層崩壊とそれによってできた天然ダムを示したものである。深層崩壊の発生等による土砂供給により、本川では1m～3、4mの河床上昇、ダムの下流では河床低下が見られた。写真-3は、(a)支川での土砂堆積、(b)本川での土砂堆積、(c)二津野ダムの直下流の河床低下、(d)二津野ダム下流の堆積が顕著な



写真-4 二津野ダム堆砂の除去と土地の造成

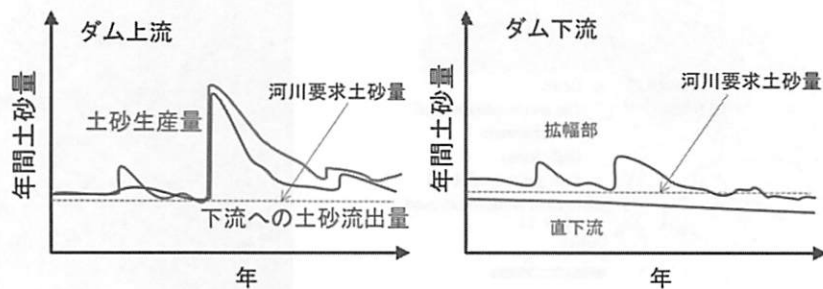


図-8 熊野川流域の土砂動態の概念図

区間の状況を示したものである。今後、深層崩壊で生産された土砂が徐々に本川に流入してくると思われる。

(3) 災害前の状況

この流域では、貯水池堆砂と濁水が長年重要な問題となっている。貯水池堆砂は背水末端付近の堆砂による治水安全度の低下が問題で、恒久的な対策を見つけることが課題であった。堆積土砂を貯水池内の死水領域へ押し込む方法と除石した土砂を地域での土地造成によって対処していた。写真-4 は二津野ダム上流の西川で行われている造成方法の例であるが、河川の蛇行部をショートカットし (A)、流水が止められた蛇行部に土砂を運び造成しているところ (B) を示したものである。このような方法は土地の少ない山間部においては有望な方法であるが、やがて適地がなくなり事業の持続性が保障されていない。二津野ダムの下流では写真-3(c)のように河床低下が徐々に進行しているが、川幅が広い本宮地区 (写真-3(d)) では土砂の堆積が問題になっていた。恒常的に砂利採取によって河床上昇を抑えていた。

このようにこの流域では基本的に貯水池が土砂動態に影響を与え、貯水池の下流では河床低下、上流では河床上昇が問題となっていたが、深層崩壊や表層崩壊による過剰な土砂供給が急激な河床上昇を引き起こすことが重要な問題になった。図-8 はそのような状況を二津野ダムの上下流域で図示したものである。二津野ダムの下流では、川幅の変化により局所的に土砂が堆積する部分があり、単純な河床低下の問題としてではなく、全体的には河床低下傾向の中で局所的に土砂が堆積する区間があることを考慮しなければならない。

(4) 土砂管理の考え方

過去、現在と将来の河道の状況を見ながら土砂管理するためには、土砂動態モデルを活用することが望ましい。そこで、前述の山野井・藤田のモデルを用いて、実施可能な土砂管理方策に沿った複数のシナリオに基づいた長期計算を行い、台風12号後の熊野川の土砂管理について検討する¹⁹⁾。ただし、具体的に検討するために実河川のデータを用了が、予測計算などの精度の検証を詳細に行っていないので、一つの土砂管理の考え方の例を提示するものと理解されたい。

対象流域は図-7 に示す流域で、風屋ダムと二津野ダムを含む流域である。データには過去10年間の降雨を10回繰り返して与えることで100年に相当する期間の計算を行う。台風12号による土砂生産量は個々の崩壊面積からGuzzettiの方法²⁰⁾で推定した。支流域における土砂生産量の算定結果と、年平均生産量 (二津野ダム比堆砂量か

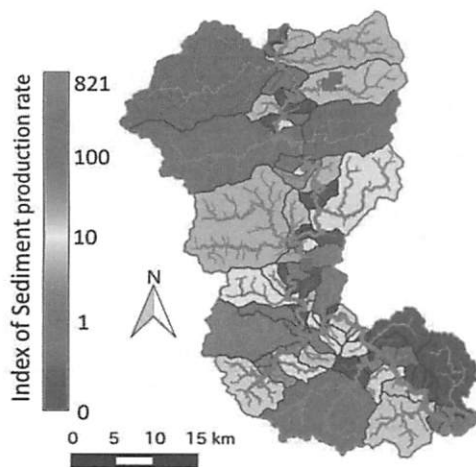


図-9 台風 12 号による土砂生産量と年生産土砂量の比

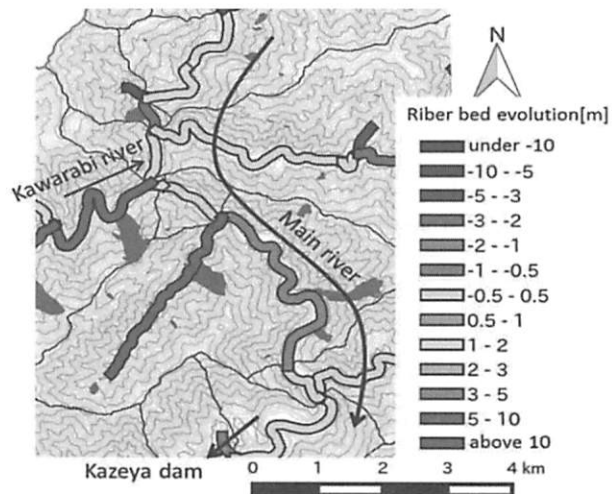


図-10 台風 12 号直後の河道土砂堆積高の計算結果

ら推定) の比は図-9 のように表される。一部の支流域では数十～数百年分の土砂が一度に生産されたと推定される。なお、生産された土砂のうち河道に供給されるタイミングと量の推定は困難である。そこで、奈良県の公開している資料²¹⁾を参考に、実際に深層崩壊が発生し始めた時刻に全箇所の土砂を供給した。また、本計算では、供給量は生産量の 1/2 とし、残りの量は再移動が起こらずに崩壊地上に残存するものと仮定した。この条件で台風 12 号後の河床土砂堆積量を算定した。図-10 はその結果を示したもので、前述した実河川の状態とほぼ一致している。

土砂管理方策と計算シナリオは以下のようなものである。まず、流域の特性と台風 12 号の影響を把握するため、台風後 100 年間何も対策をしない場合(S.1)と、台風 12 号の土砂生産・洪水が発生しなかったとして 100 年間経過する場合(S.2)を計算する。次に、ダムに流入する土砂を全量下流に流した場合(S.3-100%)を計算する。これで流域内に問題が生じなければ、これが最良の方策であると考えられるが、急激な流砂の増加により一部で河床上昇が生じるものと推定される。河床上昇が生じれば洪水危険度が上昇するため、除石の必要が生じ、新たなコストがかかってしまう。そこで、S.3-50%, S.3-20%, S.3-10%によって、通砂量を 50, 20, 10%に低減した場合を考える。この場合は貯水池における堆砂の除去が必要になる。つぎに、流入してくる支川からの土砂流入を砂防事業等によって抑制することを考える。これにより本川の河床上昇を低減し、より多くの土砂が流せるだけの余地を本川に創出できると期待できる。そこで、S.4 では拡幅部があり河床が上昇しやすいと推定される二津野ダム下流付近に合流する支川にこの対策を実施したとして、その支川から本川への土砂流入量を 0 にして計算する。ここでも同様に通砂量を 100, 50, 20, 10%と変化させるものとする。

(a) 堆砂への影響

台風 12 号の後の風屋ダムおよび二津野ダムに流入する年流入土砂量の値(S.1)を台風 12 号がなかった場合(S.2)で割った流入土砂量の比の経年変化を図-11 に示す。今後 10 年間はダムへの土砂の流入量が 1.5 倍以上となる状態が続く、台風 12 号による土砂流入量の増加は今後 60~80 年程度継続することとなる。

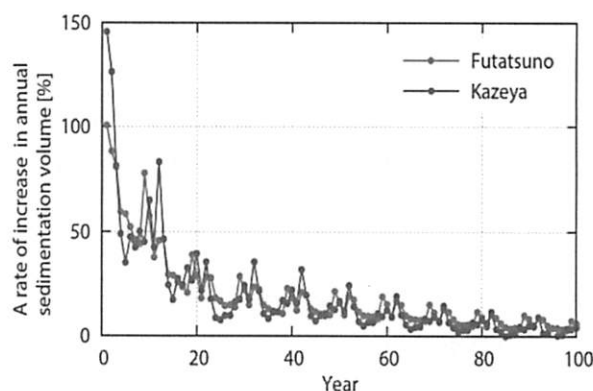


図-11 S.1 (台風 12 号有) の流入土砂量と S.2 (台風 12 号無) の流入土砂量の比。

(b) ダム直下部の河床変動

ダム直下部の各シナリオにおける河床変動量は図-12 のようになった。二津野ダムの直下では、台風 12 号による大出水により河床が約 2m 程度低下しているが、これは通砂を行う余裕高を与えたことを意味する。そこで、100%の通砂を行うと河床が上昇するが今後約 40 年間は元の河床位まで戻らない。したがって、この箇所に限って言えば 100%の通砂を 40 年間継続する事が可能である。また通砂量を 50%以下に抑制すると、河床はほとんど上昇しないと予想される。

一方、風屋ダムの直下では深層崩壊による大規模土砂生産があり、台風 12 号直後の時点で河床が上昇している。このため、通砂をしない場合でも元の河床位に戻るまで 10 年間を要す。そこで、この間は通砂をすることなく、10 年後からの通砂を開始するほうが望ましいと考えられる。ただし、それでも 100%通砂した場合は河床上昇傾向になるため、土砂の除去を併用するか、通砂量を 50%以下に抑える必要があると考えられる。

(c) 堆積が顕著な区間の河床変動

河床上昇が顕著な、二津野ダム下流にある拡幅部の河床変動量を図-13 に示す。この付近は土砂の輸送能力が小さいため、台風 12 号の有無に関わらず河床が徐々に上昇する。このため、100%通砂した場合は河床上昇が促進され開始後 20 年で約 1m 程度での河床上昇が起こり、周囲の洪水危険度の上昇が危惧される。しかし、支川へ対策を講じた S.4 では河床上昇の程度が軽減することがわかる。特に、支川対策を行った上で 50%通砂する場合(S.4-50%)は河床上昇の速度が 1m/100year 程度であり、小規模な浚渫を併用する必要が生じる可能性はあるが、あまり洪水危険度を上昇させずに通砂が可能であると考えられる。

(d) 流域全体の河床変動量

S.3-100% (通砂あり) と S.1 (通砂無し) の 100 年分の河床変動量の差を図-14 に示す。これによると 100%の通砂を行う場合、二津野ダム、風屋ダム双方の下流約 10km までの区間では、通砂による影響が 2m 以上あることが確認できる。しかし、北山川との合流点より下流などダムから十分に離れると通砂の影響が無視できる程度であることが分かる。すなわち、通砂による影響を抑えるための対策は、ダムか

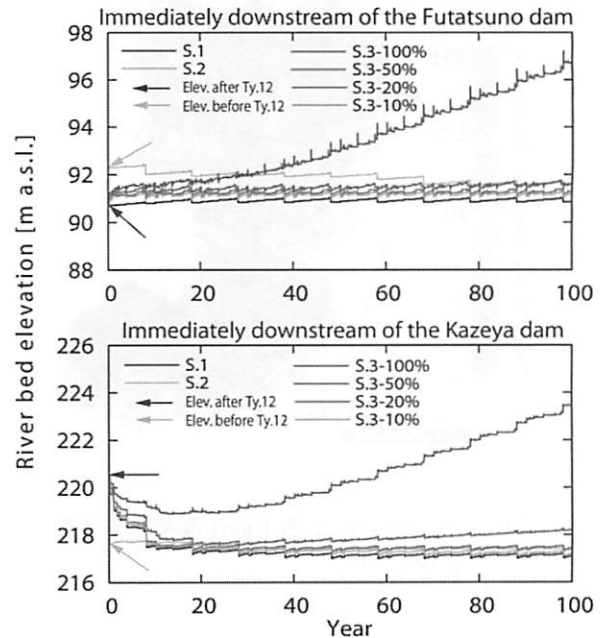


図-12 ダム直下部における河床変動量。

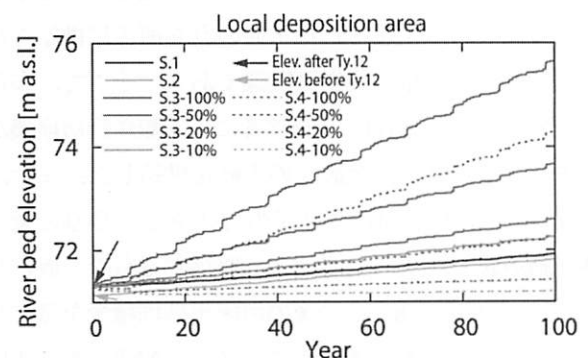


図-13 堆積が顕著な区間における河床変動量。

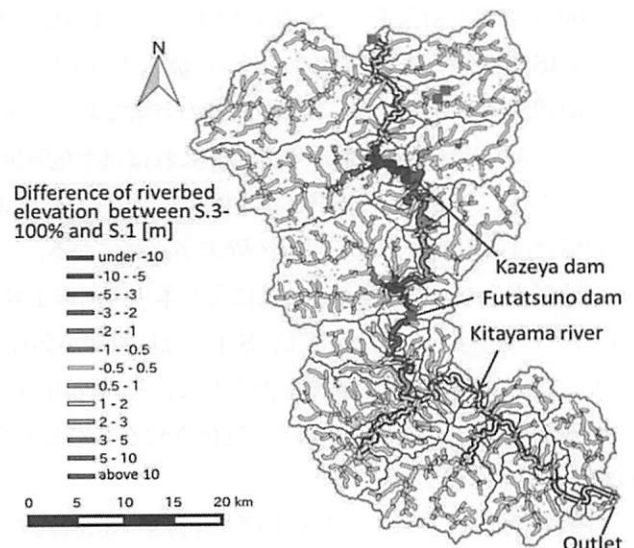


図-14 S.3-100% (通砂あり) と S.1 (通砂無し) の 100 年間の河床変動量の差。

ら十分に下流に離れた箇所ではあまり必要ではないこと、言い換えればダムの下流の限られた範囲のみに河床上昇の対策を実施すれば十分ということになる。したがって、今後より正確に通砂の影響範囲を計算できれば、対策が必要な範囲とそれに要するコストまで計算できるようになると期待できる。

以上、台風12号以後の熊野川の土砂管理の一例を具体的に示した。検討結果の妥当性については今後検証する必要があるが、土砂管理の具体策を立てるうえでの考え方の一例として紹介した。

5. おわりに

流域の土砂管理について、事業の実施を促進するために必要な問題点として、土砂管理の理念形成、技術的問題、実施上の問題などについて述べ、その解決に向けた現在の取り組みをいくつか紹介した。水管理と比較しながら土砂資源利用という観点が必要であることも指摘した。洪水による災害リスクは豪雨の後は解消され、豪雨が終わると貯水池に貯留した水を利用するという明確な仕組みがある。一方、土砂災害の場合、豪雨終了後も長期にわたって二次災害の危険性が引き続き残る。このような水と土砂の特性の違いが土砂管理を困難にしているとも言える。最後に、土砂管理において防災と環境が両立するために、今後研究すべき課題を列挙して結語としたい。

(1) ハビタットロジーの構築

生息場の構造と維持のしくみを科学する学問の知見を用いると、生息場保全・復元のための流量と流砂量の定量的条件が設定できるようになる。生態学と土砂水文学の融合研究を今後進めて、ハビタットロジーを構築していく必要がある。

(2) 河床変動計算モデル、土砂動態モデルの高度化

地形だけでなく空隙率、地下水などの生息場物理環境の変化予測が行えるように、河床変動計算モデルを高度化する必要がある。安全面だけの予測でなく、生息場物理環境の変化を予測する河床変動モデルの開発が望まれる。

(3) 新たな河床管理の考え方

ある河床高維持するという考えから、ある幅の範囲に河床変動を収め、その中で河床変動を許容するという考えに変えることで、土砂管理の具体策の選択肢が増え、環境保全や土砂の有効利用の面で色々なアイデアが生まれる。

(4) 土砂資源管理の観点

安全や環境保全の観点で土砂管理の具体策を考えることができて、実際に実施するためには土砂の除去、運搬などが必要になる。したがって、これを可能にしなければ、防災と環境の両立を目指した土砂管理は実行できない。そこで、土砂の資源的価値を見直し、また創生すれば、土砂資源利用のカードが増え、土砂管理の具体策の実施が円滑に進むと考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省：<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/dosyakanri.html>
- 2) 土木学会水理委員会環境水理部会：貯水池土砂管理の現状と将来、シンポジウム発表概要集，2006
- 3) 土木学会水理委員会環境水理部会：置き土シンポジウム，発表概要集，2008
- 4) 末次忠司：河川の減災マニュアル，山海堂，pp.174-175，2004
- 5) 堤大三，藤田正治，Muhammad Sulaiman：混合砂礫河床材料の空隙に関するシミュレーションモデル，水工学論文集，第50巻，pp.1021-1026，2006
- 6) 藤田正治，Muhammad Sulaiman，Jazaul Ikhsan，堤大三：河床材料の空隙率の変化を考慮した河床変動モデルとその適用，河川技術論文集，第14巻，pp.13-18，2008
- 7) 岩見収二，細井寛昭，藤田正治：現地河川への適用を考慮した空隙率の変化を反映した河床変動計算，河川技術論文集，第21巻，pp.143-148，2015
- 8) 上戸亮典：網状河川及び砂州河川に形成される動植物生息場の物理環境の変動特性，京都大学工学研究科社会

基盤工学専攻修士論文, 2013

- 9) 高橋保, 井上素行, 中川一, 里深好文: 山岳流域からの土砂流出モデルを用いた貯水池堆砂の予測, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.841-846, 2001
- 10) 江頭進治, 松木敬: 河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.735-740, 2000
- 11) 砂田憲吾, 長谷川登: 国土数値情報に基づく山地河川水系全体における土砂動態のモデル化の試み, 土木学会論文集, No.485, pp.37-44, 1994
- 12) 山野井一輝, 藤田正治: 土砂生産・土砂供給・土砂輸送堆積統合モデル開発と山地流域への適用, 水工学論文集, 第 58 巻, pp.925-930, 2014
- 13) 泉山寛明, 堤大三, 藤田正治: 地質を考慮した凍結融解土砂生産の推定法, 京都大学防災研究所年報, 第 55 号 B, pp.399-406, 2012
- 14) 芦田和男, 高橋保, 沢田豊明: 山地流域における出水と土砂流出(12), 京都大学防災研究所年報, 第 26 号 B-2, pp.303-314, 1983
- 15) 竹門康弘: 土木学会水理委員会基礎水理部会 2013 年度基礎水理シンポジウムー移動床水理学が生態系保全に果たす役割ー, 発表資料, 2013
- 16) 竹門康弘: 国土交通省河川砂防技術研究開発, 平成 22 年度採択テーマ報告書, 2012
- 17) 野村理絵, 竹門康弘, 堤大三, 寶馨: 山地溪流の土砂生産の違いが生息場構造と底生動物群集に及ぼす影響, 京都大学防災研究所年報, 第 52 号 B, pp.905-912, 2009
- 18) 鈴木裕一郎, 藤田正治, 竹門康弘, 堤大三, 竹林洋史: 山地溪流の生息場構造デザインモデルの開発, 平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 356-357, 2010
- 19) 山野井一輝, 藤田正治: 大規模な土砂生産および洪水後の土砂管理に関する研究, 水工学論文集, 第 59 巻, 2015
- 20) Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., Valigi, D.: Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy, Earth and Planetary Science Letters, Vol.279, Issues 3-4, 2009, pp.22-229
- 21) 奈良県深層崩壊対策室: 紀伊半島大水害大規模土砂災害アーカイブ, <http://shinsouhoukai.sakura.ne.jp/>