

水源地生態研究会 2

流砂環境再生

Restoration of Sediment Transport Connectivity and Riverine Environment

京都大学防災研究所 特定教授 角 哲也
研究第三部 上席主任研究員 一柳 英隆

ダムには、一般には堆砂容量が設定されているが、計画以上の速度で堆砂が進行し、本来の貯水機能や、ダムの取水・放流機能への影響、さらには、ダム下流域の河床低下や海岸侵食の要因の一つとなっている事例も増加している。一方で、旭ダム（土砂バイパス）、長安口ダム（大規模土砂還元（置き土）、黒部川・耳川（通砂、排砂）など、堆砂対策に伴って下流河川の環境が大きく改善している事例が増加している。これらを背景に、ダムによる流水の貯留とトレードオフの関係にある土砂の連続性遮断の問題を、流砂系の総合土砂管理の枠組みとして改めて考えるとともに、その一番の鍵を、「ダムの土砂管理＝河川の流砂環境の再生」と定義し、これを進めるための最新の科学的考察と全国の先進事例を分析した成果をとりまとめて2023年10月に京都大学学術出版会から出版した。

キーワード：ダム堆砂、総合土砂管理、置き土、土砂バイパス、排砂、自然再生、河川環境

Dam reservoirs are generally designed with a sedimentation capacity. However, there are an increasing number of cases where sedimentation has progressed faster than planned, affecting the original water storage, water intake and discharge functions, and even becoming one of the factors causing riverbed degradation and coastal erosion. On the other hand, there are an increasing number of cases where the environment of downstream rivers has been greatly improved as a result of sedimentation countermeasures, such as Asahi Dam (sediment bypass), Nagayasuguchi Dam (large-scale sediment replenishment), and Kurobe River and Mimi River (sediment flushing and sluicing). Based on this background, we reconsidered the problem of interruption of sediment connectivity, which is in a trade-off relationship with the water storage, as a framework for comprehensive sediment management in sediment routing systems. We defined the key to this as "reservoir sedimentation management = restoration of sediment transport connectivity and riverine environment". In order to advance this, we analyzed the latest scientific considerations and advanced cases in Japan which were compiled and published by Kyoto University Press in October 2023.

Key words : reservoir sedimentation, comprehensive sediment management, sediment replenishment, sediment bypass, sediment flushing, nature restoration, river environment

1. はじめに

これまで、一般財団法人水源地環境センターが進める「水源地生態研究会」の活動成果の普及の一環として、京都大学学術出版会から「ダムと環境の科学」シリーズを出版してきた。これまで、第Ⅰ巻「ダム下流生態系（池淵周一編著）」、第Ⅱ巻「ダム湖生態系と流域環境保全（大森浩二・一柳英隆編著）」、第Ⅲ巻「エコトーンと環境創出（谷田一三・江崎保男・一柳英隆編著）」がリリースされている。

本書「流砂環境再生（角 哲也・竹門康弘・天野邦彦・一柳英隆編著）」（図-1）は、そのシリーズ第Ⅳ巻であり、2023年10月に出版された。ここでは、その概要について紹介する。

また、本書の理解のために「電力土木」に掲載され

た書評をひとつ転載しておく。

2. 本書が目指したもの（はじめにより）

人類はダムを築造することで流れる川を堰き止め、その水を農業や飲み水として利用する文明を築き上げてきた。日本最古のダムは大阪の狭山池であり、7世紀前半に遡る（本書第1章参照）。自然・社会的環境影響などにより、一時はダム建設が懐疑的にみられる時代もあったが、今では、気候変動適応策として、異常洪水対策や異常渇水対策、さらには、カーボンニュートラルに貢献する国産の再生可能エネルギー源である水力発電を生み出すダムの役割と効果が大きく見直されている。その一方で、ダムは川によって運ばれる「流砂」も同時に遮断する宿命があり、ここに本書の主題

Part I	日本の河川とダム
第1章	日本におけるダム開発と堆砂問題
第2章	総合土砂管理
第3章	ダム再生の動向
Part II	流域土砂管理の科学
第4章	ダムのリスクマネジメントとアセットマネジメントとしての土砂管理
第5章	ダム下流の河道管理と土砂
第6章	河道土砂管理のための流砂・河床変動の数値解析
第7章	土砂還元（置き土）のモデル化
第8章	河川の環境管理としての土砂管理
Part III	進む土砂管理
第9章	日本の土砂還元（置き土）の最新事情
第10章	土砂バイパスによる土砂供給効果
第11章	黒部川における連携排砂の歴史と現状
第12章	天竜川流砂系の総合土砂管理
第13章	耳川のダム通砂を支えた産官学民のカルテット
第14章	那賀川における持続的土砂管理へ向けた取り組み
座談会 これからのダムの土砂管理：流砂環境の再生に向けて	



図-1 本書の章構成と表紙

である「ダム堆砂問題」と、これに正面から向き合う「流砂環境の再生」がある。

このようなダムは、数ある社会基盤施設の中でも、本来最も長期間の供用が期待される施設である。その理由として、ダム堤体として本来十分な耐久性を有していることに加えて、ダム建設に要する準備期間の長さ、水没に伴う地域社会への影響、および、さまざまな自然環境への影響を考慮すれば、使い捨てにせず、適切な維持管理を行って長寿命化を図るとともに、効果的な投資を行って治水・利水・環境の面で新たな付加価値を創造することも重要である（第4章参照）。

その具体的な施策として、2017年に「ダム再生ビジョン（～頻発する洪水・渇水の被害軽減や再生可能エネルギー導入に向けた既設ダムの有効活用～）」が国土交通省により策定された。これは、近年における厳しい財政状況等の社会情勢、洪水・渇水被害の頻発や気候変動の影響の顕在化、既設ダムの有効活用の様々な特長や、これまでの事例の積み重ねによる知見の蓄積、これを支える各種技術の進展を踏まえて、ソフト・ハード対策の両面から既設ダムを有効活用して、その持続可能性を高めることを目指したものである（第3章参照）。

「ダム再生」の重要な柱として、「ダムの長寿命化」と「河川環境の保全と再生」が取り上げられている。「ダムの長寿命化」を実現させるための最大の課題は「ダム堆砂」である。ダムの堆砂対策を後回しにしないことは、後世に負担を回さない「世代間の衡平（こうへい）」の考え方にとって極めて重要なポイントである。「これまで堆砂が著しいダムで先行的に堆砂対策を実施してきたが、ダムを半永久的に活用できる施設としていく

ため、より効果的・効率的な堆砂対策として、土砂バイパス施設の設置による堆砂の抑制や貯砂ダム、貯水池内への進入路の設置や土砂仮置場の確保等による堆砂排除等、堆砂状況や地形・地質等に応じた対策を一層推進するとともに、知見を蓄積し、新たな工法の積極的な導入を検討する」ことが謳われた（第4章参照）。

一方、「河川環境の保全と再生」のためには、「土砂動態の改善や下流河川の自然環境・物理環境の改善、水生生物等の移動の連続性の確保、貯水池の水環境の改善等をより効果的に行うために、既設ダムで実施してきたフラッシュ放流や小規模洪水を流下させることなどによるダイナミズムの確保、置き土による下流への土砂還元などの河川環境改善に関する施策について効果の検証を行い、河川環境の更なる改善のための手法の調査・研究を推進する」ことが謳われた（第5、8、9章参照）。

ここで、河川環境に関する課題は、ダムごとに施設の特性或地域の環境の特性に応じて対応する施策も異なる。そこで、対策の実施においては、ダム建設事業に係る環境影響評価の検討等で培った応用生態工学などの知見を活用し、土砂還元により堆砂量を軽減するなどのダム長寿命化に対する貢献と、河川環境改善に関する効果を一体として考え、土砂の量と質（粒径）の面から総合的に検討することが重要である。また、土砂管理の計画・実施・評価においては、上流の土砂生産域から海岸までの土砂移動の連続性を改善する流砂系全体としての持続可能な総合的な土砂管理の目標設定や、流域の関係者の事業連携を促進するなど、総合的な土砂管理を推進する体制の構築を図ることが求められる（第2章参照）。

日本における土砂管理の歴史は古く、その先進事例として、神戸市水道局の布引五本松ダムがあげられる。このダムは日本最古の重力式ダムとして有名であるが、1900年のダム完成8年後に土砂バイパストンネルが造られ、その後、堆砂対策としてのバイパス機能が長年にわたって有効に活用されてきた。これにより、約25年で貯水池が満砂していたところを、理論上、容量的には千年以上の長寿命化が実現したと推定されている（第4章参照）。

これらの他にも、本格的な土砂管理を実施している事例として、安定的なダム排砂が実現されている黒部川連携排砂（第11章参照）や、電力ダムの土砂管理の好事例と考えられる宮崎の耳川水系ダム群の再開発によるダム通砂（洪水吐を改造して、洪水時に土砂を通過させるように貯水位を一時的に低下）（第13章参照）、さらには、四国の那賀川の長安口ダム下流における大規模な土砂還元（ダム上流で掘削した土砂を下流河道に投入）（第14章参照）などがある。

一方で、これらの事業の主たるプレーヤーはまだまだダム管理者にとどまっている。カリフォルニア大学バークレー校のコンドルフ(Kondolf)教授は、「Hungry Water (1997)」という言葉を用いて、砂利採取やダム建設によって土砂が不足した河川の課題と土砂投入による再生の重要性を指摘した（コラム2 参照）。カリフォルニアでは、サケの産卵床再生を主目的に多くのダムで土砂還元が実施されてきた。欧州では、近年、「Bed Load Budget（掃流砂の土砂収支）」の変化を評価し、この回復を目指す方針が打ち出された（コラム3参照、図-2）。

日本の総合土砂管理の推進には、ダム管理者と下流管理者の連携、特に、漁業関係者の理解と支持を得る

ことが鍵となる。そのためには、河川にとっての土砂、河道内の地形を形成する掃流砂の役割を、特に河川環境面から改めて定義し、彼らにも理解が得られるような形で提供する必要がある。天竜川の佐久間ダムはすでに完成60年を超えたが、侵食海岸の修復・保全等のためにも流域一貫とした土砂移動の連続性の確保が急務であり、現在、発電専用の佐久間ダムに治水機能を新たに確保し、恒久的な堆砂対策を本格的に進めるダム再編事業が進められている（第12章参照）。

一般に、土砂供給は増水時の河床礫表面の平滑化（クレンジング）に貢献するとともに、粗粒化の緩和などに寄与することが期待されている。さらに一歩進んで、天竜川における我々の調査では、アユ（図-3右下）産卵環境の再生には、軟らかい小砂利（30～50mm程度）の河床と酸素を十分含んだ清澄な水の供給が重要であることが示された。そのためには、砂州が年数回の洪水で常に攪乱されることでリフレッシュし、砂州内間隙を流れる伏流水（Hyporheic flow）が健全に維持されることが重要であり、これが汚濁物質（濁水や粒状有機物）のフィルタリングと浄化に働くとともに、砂州下流部の湧水に伴う上昇水を発生させ、これが産卵床に好適な河床環境を形成・維持することになる（第10章参照）。

熊本県の球磨川荒瀬ダムでは、ダム撤去に伴って貯水池内から流出した粗粒土砂がダム直下に新たな砂州を形成し、これに伴って新たな湧水環境が創出されるとともに、下流の砂州周辺では近年にないアユの産卵数が確認された（第10章、コラム5参照）。耳川でも、ダム改造後の通砂運用に伴って西郷ダム下流の砂州が順次再生してきており、魚類の生息場形成や濁水緩和が期待されている（コラム14参照）。いち早く土砂バイパスの運用を開始した関西電力の旭ダムでは、運用

15コラム：
 土砂生産・流出と気候変動
 Hungry Water, Bed Load Budget
 土砂資源マネジメント
 樹林化と礫河原再生と土砂管理
 荒瀬ダム撤去と干潟再生
 DNAメタバーコーディング
 土砂管理と計測技術
 流水型ダム，土砂管理と地元連携
 土砂供給効果の予測・評価手法
 土砂管理の経済評価， RESCONモデル，意思決定問題と多基準分析

図-2 本書のコラム



図-3 裏表紙掲載写真

開始後数年でダム下流の河床材料や水生昆虫の種組成がダム上流河道に類似するまで環境が大きく変化したことも明らかとなっている(第10章参照)。本書では、このようなダムからの土砂供給による河川環境の改善を「流砂環境の再生」と定義し、その考え方の整理と実践的な取り組みを紹介している。

このように、土砂管理の先進事例は少しずつ積みあがってきているが、その一般化は容易ではない。河川流域の特性は千差万別、ダムの構造や運用もそれぞれが一品生産、ましてや、ダム建設後の数十年の経過を経て、土砂管理として取り組む新たなパラダイムの構築には、ステークホルダーによっても異なる価値観のぶつかり合いを避けては通れない。それでも、最終的なゴールである持続可能なダム堆砂対策を目指して、いかに実行可能な解を模索するかが重要である。これを解く鍵は、治水、利水、社会環境、自然環境、経済

などの視点を代表する各プレーヤーが、できるだけ土砂管理に対する個々の課題の定量化を行って、課題ごとに許容可能な条件を「不等式」の形で示し、これらを持ち寄って、「連立不等式」の形で「課題の見える化」を行うことであろう。これに対して、技術的に実行可能な複数のシナリオを工学者が提示して、条件を変化させた場合の各視点に対する影響度を感度分析しながら確認する。その上で、導かれた実行可能解を選択して実施を進め、その効果や影響をモニタリングしながら評価・改善を進める。土砂管理はいずれにしても壮大な社会実験であり、徹底的に現場主義に徹し、かつ、丁寧に実施する必要がある(第4、8章、コラム7、8、15など参照)。また、流砂環境の再生を支える最新技術の開発も重要であり、数値計算による河床変動解析技術(第6、7章参照)、指標生物を用いた流砂環境の再生の効果評価技術(コラム9、10など)、ドローンや画像



角 哲也

福島雅紀

諏訪義雄

竹門康弘

藤田正治

図-4 座談会参加者

図-5 流域における土砂管理

解析を用いた最先端の環境評価技術（コラム11 など）、また、市民協働で流砂環境の再生に取り組む働きかけも重要である（第8、13章、コラム13など参照）。近年は、「SAND WARS（砂の戦争）」とも呼ばれるように、世界的に「砂不足」の危機も取り上げられており、この観点からもダム堆砂の有効利用を促進する必要がある。

本書は、こうしたダムの持続可能性を高めるための土砂管理を少しでも前に進めるために企画されたもので、Part I（日本の河川とダム）、Part II（流域土砂管理の科学）、Part III（進む土砂管理）、Part IV（これからの土砂管理、「流砂環境の再生に向けて」の討論（図-4））の四部構成となっている。

3. おわりに

本書は、日本のダム開発の歴史を振り返るとともに、ダムによる流水の貯留とトレードオフの関係にある土砂の連続性遮断の問題を、流砂系の総合土砂管理の枠組みとして改めて考えるとともに、その一番の鍵を、「ダムの土砂管理＝河川の流砂環境の再生」と定義し、これを進めるための科学的考察と実践の最前線の分析に取り組んだ。

その基本は、座談会で藤田が指摘しているように、「ダムからどのように土砂を流して、安全・環境・利用という三つの視点を満足させるか」、その際には、「流域の中での対立と持続可能性の問題」に取り組むことが重要であり、これをローカルに解決するのではなく、流域関係者全員で取り組む重要性が再認識された。この点では、近年急激に社会のコンセンサスが進んでいる「流域治水」（河川の流域のあらゆる関係者が協働して流域全体で行う治水対策）と同様な視点である。ただし、治水の場合は、迫りくる異常洪水に向かって皆がどう立ち向かうか、という意味でまとまりやすいが、土砂の場合は関係者の思い描く課題認識が大きく異なっており、ダム堆砂をどうにかしないとイケないという危機感の高い人、ダムが大きいのでまだまだ大丈夫と思っている人、土砂が流れてくることに対して否定的に捉えている人など、時間的、空間的な会話がそもそもかみ合っていないのが現状である。

この問題を解く鍵として、本書では総合土砂管理は「連立不等式の問題」として考えることを提案した。砂防があり、ダムがあり、河川があり、海岸があり、環境があり、利水者や港湾管理者など、さまざまな関係者がそれぞれプラス、マイナスの意見を持っており、これらをどう定式化できるかがポイントである。それぞれの条件ごとに、許容可能で、かつ、目的を達

成できる範囲（土砂量と粒径（有効粒径集団））は、いくらからいくらまでか、その上で、お互いが最終的にWin-Winになれるような「連立不等式の解」をいかに見つけるかという問題である。例えば、上流のダムが土砂を流すと下流のダムでは土砂流入量が増加するが、どの程度の粒径までであれば通砂（スルーシグ）が可能であるか、一部堆積する土砂も、どの程度の量までであれば維持掘削で対処可能であるか、下流の河道も、どの程度の流砂量の増加までは治水上のリスクを増大させずに通過させることができるのか、一方で、下流河道の河川環境の再生のためには、いくら以上の、どのような粒径の土砂供給量が必要なのか、などが立ちどころに問題となる。

本書では、このような問題に対処していくための多角的な考え方を各執筆者から提示している。ダムのアセットマネジメントやリスクマネジメントの視点、河道管理と土砂管理の視点、河川の環境管理の視点、土砂資源マネジメントの視点、黒部川や耳川の連携排砂や通砂、那賀川の大規模土砂還元の先進事例など、本書で取り上げた各章やコラムは、こうした問題に現場で立ち向かうためのヒントが満載されていると確信している。その一例として、第4章および第8章では、木津川を例に、ダムの長寿命化を実現するための必要排砂量と下流河道の河川生態系の再生からの必要土砂量の両者をどのように組み合わせるかの検討事例を紹介した。今後は、このような複数の視点からの目的関数を設定し、土砂供給量や粒径を説明変数として感度分析を行うようなアプローチの一般化を期待したい。

その上で、最終的に関係者が納得感を持って同じ方向に進むことを可能にする最後のピースは、流域治水と流砂系総合土砂管理の一体化、すなわち「流域マネジメント」の推進であろう。流域の問題には、多すぎる水（洪水）、少なすぎる水（渇水）もあれば、多すぎる土砂（災害）、少なすぎる土砂（河床低下、海岸侵食、河川環境劣化）もある。その中でいかに流域のマネジメントを進めるか、その中には当然土砂資源の価値なども内在されており、これらの「全体最適」を、洪水と土砂の両者の管理でどう実現するのかが重要である（図-5）。第13章で紹介されたように、「いい耳川をつくる」のコンセプトで、流域管理に係るあらゆる関係者の実施すべきことを可視化し、定期的に「評価・改善」しながら進められている耳川の取り組みは大いに示唆に富んでいる。

本書では直接的に海外の話題は取り上げていないが、例えば、メコン川流域では上流のダム開発で土砂供給が激減しており、ベトナムのメコンデルタでは、

河床低下による塩水遡上の拡大や河岸侵食・海岸侵食の拡大が大きな社会問題となっている。メコン川まで行かなくとも、ベトナム中部のVu Gia Thu Bon 川河口では海岸侵食が大きく進行しており、インドネシアでは、日本のODA で建設されたダムの土砂堆積が進行して本格的な堆砂対策への技術協力要請が来るなど、ASEAN諸国の河川流域では、かつて日本が来た道を「着実に」追いかけてきている。土砂は不可逆的な問題であり、放置すれば後年の対応がより大変になる。今のうちに対策を講じておけば将来30年、50年先に起こることを少しでも小さくできるのではないか、日本はそういうことを経験してきたのではないか、その意味で、日本がこれまで取り組んできている流砂系の総合土砂管理の経験を、今こそ彼らに伝えていくべき重要なタイミングに来ているのではないかと痛切に感じている。

翻って、日本の現状はどうであろうか。日本全国にも多くの河川があり、まだまだ温度差があるのが現状である。ここはまだまだ大丈夫と思っている場所でも、今のうちからやっておけば将来の管理コストが大きく節約できる可能性があり、特定の河川だけ総合土砂管理を実施するのではなく、他の河川もいずれは必要であり、次に続く予備軍もたくさんあるという意識で進めていくことが望ましい。それが本当の意味での流砂環境の再生の標準的な姿になると考えられる。スイスやEUが進めている「Bed Load Budget (掃流砂の土砂収支)」は、そのような観点からも画期的な取り組みであり、日本でも同様な取り組みが加速することを期待したい。最後は、そのような行動を起こすコンセンサスを特定の人たちだけで共有するのではなく、一般市民の人たちにもどう訴えかけていくのが問われている。そのためには、長期的な視点で情報を提示し、一緒に考える仕掛けづくりが重要である。本書で取り上げた木津川や天竜川の取り組みもその一つと考えられる。さらに座談会で提案した「土砂資源マネジメントと事前復興」の視点など、多面的な方向性の議論が加速されることが、この本の価値になると考えている。

本書が、すでに土砂管理に具体的に取り組まれている方々、準備段階の方々、課題を意識しつつも、その解決の方向性の打ち出し方に思案されている方々、これらそれぞれの段階の政策立案者、決定者、具体的な事業デザイナーおよびその実施者、それぞれの担当の方々の参考になれば望外の喜びである。

最後に、ユネスコのStevan Bruk という人がダムの堆砂対策の重要性について残したメッセージを紹介しておきたい。「Do it now ! Do it quick !」

書評

“土砂管理とは各プレーヤーの許容可能範囲を示す「不等式」を持ち寄り、集まった「連立不等式」を解くものである”というフレーズが私の目に飛び込んできた。「言い得て妙」であると感じて読み進めると、“工学者が実行可能な複数のシナリオを示して合意に導き、実施・評価・改善していく”と書いてある。最初の数ページで「なるほど」から「やるぞー」まで導いてくれる。

1998年に「総合土砂管理」の考え方が河川審議会総合政策委員会の中に設けられた小委員会の報告にて明確に示された。この考え方を受けて、黒部川連係排砂や天竜川上流のダムにおける土砂バイパストンネルなど優れたアイデアが実現された。2017年にはダム再生ビジョンが策定され、「ダムの長寿命化」と「河川環境の保全と再生」が取り上げられた。これらを実現するための最大の課題は「ダム堆砂」である。ビジョンでは考え方や指針が示されている。優れた事例や指針があるにも関わらず、私達は多くの地点で「連立不等式」を解けずにいる。

その理由を簡潔に言うと「課題のユニークさ」であるだろう。この地点ではこうすれば良い、という常套はなく、全てが特別な条件下にあり、遠くに目的はあっても明確な目標は設定し難い。そして、調整すべき関係者はとにかく多い、これらがダム総合土砂管理を難しくしている。

「流砂環境再生」は、課題のユニークさを受け入れろ、としている一方、現時点における国内外での好先行事例のほぼ全てを紹介することにより明確な目標の選択肢を私達工学者に示してくれている。私達工学者は複数のシナリオを作って、時には連立不等式の上限值・下限値を調整し、関係者が合意する解を導かねばならない。

「流域再生」は、私達工学者がシナリオ作りにおいて最も配慮しなくてはならない事項の1つであるが、不得手としている「河川の環境管理」について、流砂場を調えるという物理的アプローチから生息場の改善を期待する手法を教えてくれる。勇気をもって大きなアプローチをしなければ、目に見える改善の効果は得難いと述べられている。

「流域環境再生」には15のコラムが寄せられており、それらはホットな話題にかかる情報や識者の見解を私達に伝えてくれる。気候変動の影響、Bed Load Budget、土砂資源、関係団体との連携、土砂管理の経済価値など、その単語を目にするだけで椅子から腰が浮き上がってくる感覚となる。これらが伝えてくる内容は私達がシナリオ作りをするうえで大いに助けと

なるだろう。

さあ、悩める工学者各位、本書から得られる知見と刺激で、日本の未来、水力の未来、ダムの未来、河川・海岸の未来を明るくしていこう。

(奥村裕史(電源開発株) 電力土木No.429, 2024.1)

謝辞

「ダムと環境の科学」シリーズは、一般財団法人水源地環境センターのもとに設置された水源地生態研究会の成果を公開することを目的の一つとして企画されたものである。本書の一部の章については、2008～2019年(ダム下流生態系研究グループ、グループ長：辻本哲郎名古屋大学名誉教授)、2020年以降(ダム下流生態系研究部会、部会長：竹門康弘大阪公立大学客員研究員)の成果が反映されており、同研究会事務局を務める一般財団法人水源地環境センターからは研究費の一部補助も受けた。本書を取りまとめるにあたり、国土交通省をはじめ、多くのダム管理者・河川管理者など関係者から貴重なデータの提供を受けた。編者を代表して謝意を表す。また、一般社団法人電力土木技術協会および書評執筆者の奥村裕史氏は、「電力土木」に掲載された書評の転載を許可された。これについても謝意を表す。