

河川環境のための河床地形管理手法に関する技術開発

Development of Riverbed Geomorphological Management Method for River Environment

竹門康弘・角 哲也・藤田正治・武藤裕則⁽¹⁾・竹林洋史
堤 大三・石田裕子⁽²⁾・小林草平・玉基英⁽³⁾

Tetsuya SUMI, Yasuhiro TAKEMON, Masaharu FUJITA, Yasunori MUTO⁽¹⁾, Hiroshi TAKEBAYASHI,
Daizo TSUTSUMI, Yuko ISHIDA⁽²⁾, Sohei KOBAYASHI and Giyoung OCK⁽³⁾

(1) 徳島大学大学院建築工学研究科

(2) 摂南大学理工学部

(3) カリフォルニア大学バークレイ校

(1) Faculty of Architecture and Engineering, Tokushima University

(2) Department of Science and Engineering, Setsunan University

(3) College of Berkeley, University of California, USA

Synopsis

Riverbed geomorphology has ecological functions to support biodiversity by providing habitat structure to organisms and to promote material circling by controlling nutrient spiral length in river ecosystems. Therefore, in the river maintenance and management for the purpose of repair and regeneration of river ecosystem is able to plan for management riverbed terrain is reasonable. In this study, we selected Kizu River basin for the case study site where sediment augmentation is now under implementing. Here, we examined the criteria on river bed topography to improve river environment, and developed a model to determine the conditions for sediment supply needed to form and maintain suitable river bed topography.

キーワード: 河床地形管理, 流送土砂量, 生息場評価法, 河川環境保全, 置土

Keywords: riverbed geomorphological management, sediment load, habitat evaluation procedure, river environmental conservation, sediment augmentation

1. はじめに

治水安全度の確保・向上, 良好な河川環境の保全・復元等のため, ダム・堰等の構造物の設置・撤去や, 河道の掘削・引き堤・置土等の河道に加えられる改変が, 河床の縦横断形状, 瀬-淵等の地形, 河床材料, 植生などに及ぼす影響, 堤防をはじめとする河川管理施設の長期的な機能維持に与える影響, そしてハビタットの量・質の変化を通じて河川環境に与える影響等を明らかにすることが求められている. とり

わけ礫床河川においては, 河道整備や管理の結果生じる河床の縦横断形状や砂礫供給量・移動量の変化など個別多様な改変に対する河道の応答予測モデルと, その結果としての治水への影響(流下能力確保のための維持掘削量, 既設護岸の局所洗掘や流れに対する安定性, 樹林化の進行に伴う粗度増加など)および河川生態系を支える物理基盤への影響(保全対象となるハビタットの変化, 砂州の固定化や植生の安定的繁茂に伴う河原の喪失など)の評価手法とを組み合わせ, 河道整備・管理がもたらす結果を

総合的に把握し対策を検討するために活用可能な技術開発が重要である。

河川の本研究は、河川環境保全のための河床地形評価手法の開発、保全目標の河床地形を形成・維持するために必要な土砂供給条件の解明を通じて「河床地形管理の考え方と手法」を提案することを目的としている。そのために、木津川流域を調査対象に設定し、1) 木津川流域の木津川上流域からの流送土砂量の推定、2) 木津川本川の流送土砂量の推定、3) 河川環境保全のために必要な河床地形の評価基準の開発、4) 好適な河床地形を維持するために必要な流送土砂量の推定の各課題を、Fig. 1のように連関させて実施し、山地から三川合流までの土砂動態の現状を把握するとともに、木津川の河川環境を好適に維持するために要請される流送土砂量の目標値を提案することを目指した。

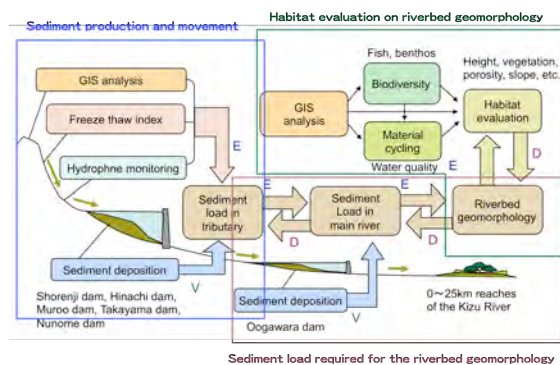


Fig. 1 Interrelations among subjects to be addressed for development of the riverbed geomorphology management in the Kizu River.

2. 本研究の構成

本研究開発は、共著者全員がFig.2のような研究課題間の関係を組織的に構成することによって実施された。各研究分担者はこの図式で互いに成果を連関できるように研究手法の擦り合わせを行った。

近畿地方整備局木津川上流河川事務所、水資源機構関西支社木津川総合管理事務所、ならびに関西電力との連携により、木津川全流域の標高データや航空写真の提供を受けるとともに、ハイドロフォンや濁度計の設置を行なった。また、各ダム流域の土砂生産・流出・ダム堆砂・浚渫量・下流置土量の情報提供を受け一方で、本研究チームによる堆砂実測結果の情報共有を進めている。さらに、淀川河川事務所からは、木津川流域における過去の横断測量データ、航空写真、レーザー測量データ、木津川たまりの地形・生物相データの情報提供を受け、

タナゴ類・イシガイ類の生息場適性を砂州地形適性に読替える手法を開発した。とくに、航空写真とレーザー測量データに基づく砂州地形分析ならびにたまりの物理環境・生物相データについては、淀川河川事務所ならびにアジア航測株式会社との共同研究によっている。本研究開発においては、上記研究者間ならびに団体間でタイアップしながら調査研究を進め、論文や学会の発表についても事務所・企業・大学の共著として発表する方針とした。

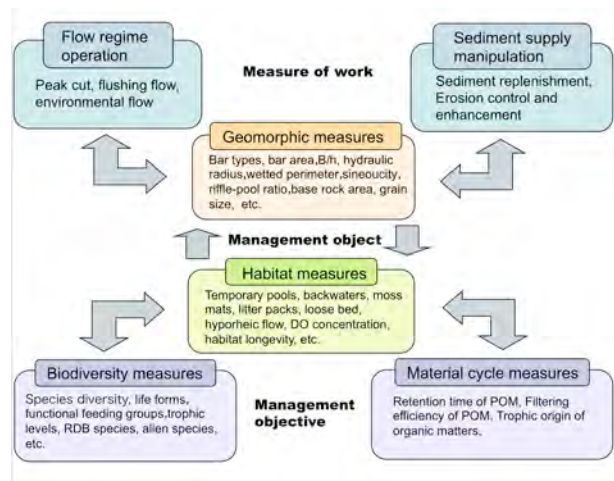


Fig. 2 Conceptual outline for development of the riverbed geomorphology management.

3. 研究成果の概要

3.1 凍結融解強度指数による流送土砂量原単位の算出

流域における恒常的な土砂生産は、冬期間の凍結融解によって裸地斜面の風化基岩が破壊されて土砂化する現象がひとつの大きな要因である事が、既往の研究によって明らかとなっている。流域における土砂動態、生態系との関わりを検討する上で、山地域において生産される土砂量を把握する事は不可欠である。そのため、凍結融解によって生産される土砂量を、熱伝導の観点から算出される凍結融解を反映した指数で代表し、流域における土砂生産の傾向を把握する事を目的として検討を進めた。ここでは凍結融解現象を反映した指数を、凍結融解強度指数と呼び、地盤内の凍結融解の繰り返し回数を深さ方向に積分した値として算出している。

平成24年度は、大河原堰堤流域、高山ダム流域、

布目ダム流域、高山ダム流域内の室生ダム流域、青蓮寺ダム領域、比奈知ダム流域の各流域において凍結融解強度指数を算出した。具体的には、航空写真から裸地を抽出し、その標高、傾斜、斜面向きをDEMデータから算出し、気温、日射量、風速のデータを入力値とする地盤の熱伝導解析によって、凍結融解強度指数を全裸地ごとに算出し、裸地面積の積の総和を流域全体の凍結融解強度指数とした。平成24年度は、この解析を木津川の各ダム流域において実施し、比凍結融解強度指数（総凍結融解強度指数/流域面積） $[\text{m}^3/\text{km}^2/\text{y}]$ とダムの比堆砂量（堆砂量/流域面積） $[\text{m}^3/\text{km}^2/\text{y}]$ とから得られた回帰式を用いて、全残流域の土砂流出量を推定した。これらを合計した木津川流域全体から流出する土砂量はおよそ17.8万 m^3/y と推定された。

3.2 ハイドロフォン観測による流送土砂量の推定

蓮寺ダム、室生川堰堤、布目ダム上流と下流において、濁度とハイドロフォンのモニタリングを行ったが、2011年9月に日本に上陸した台風12号と15号によって室生川、青蓮寺川の機器に大きな被害を受け、布目ダム下流は埋没の結果データの取得が困難になった。本報告書では、2年半にわたるハイドロフォン観測ができた布目ダム上流のデータを布目ダムの年間堆砂量と比較することによって、布目ダムに流入する年間の土砂量と流入のタイミングについて推定することができた。また、同ハイドロフォン地点で行った3回の土砂投入実験の結果、ハイドロフォンで検知される流砂の径が2mm以上であり、最も検知率が高いのは10mm以上であると考えられた。また、同じ流砂量であっても、粒径、単位時間の衝突の密度、流量や水深によってハイドロフォンの音圧やパルスが変わることが示された。

最も土砂量と最も関係が強かった増幅率8倍または16倍のチャンネルのパルス数を用いて、ハイドロフォンと土砂量の検量線を作成した。これを用いて推定された年間流砂量は、2011年では10,959 m^3 、2012年では8,715 m^3 であった。布目ダム副ダムの年間浚渫量は5,000~10,000 m^3 であり、オーダー的には概ね一致する推定結果であった。

ハイドロフォンによって流砂量の推定値が得られると、出水イベントごとの土砂流出量が推定可能となる。2011年と2012年の年間ダム堆砂量に対する台風による出水イベントの寄与は31-39%と推定され、濁度計から推定された土砂量は42-47%であった。また、増幅率16倍、4倍、2倍のチャンネルはそれぞれ、砂利小、砂利大、礫に反応していた。これらのチャンネルの消長により、出水規模による移動土砂

粒径の限界値を判断できることがわかった。

3.3 貯水ダム下流域で実現可能な土砂還元量の評価手法の開発

木津川ダム群を、水および土砂の回転率のパラメータ（CAP/MAR（いわゆる貯水池回転率の逆数）＝総貯水容量/年間総流入量および先述のCAP/MAS（貯水池寿命）＝総貯水容量/年間総流入土砂量）で整理したところ、貯水池の寿命評価（CAP（総貯水容量）/MAS（年平均流入土砂量）で全国平均の中間的な400~1,000年に該当した。このため、仮に寿命1000年のダム管理を目指すには、概ね流入土砂量の1/2を排出できればよいと推定された。

いっぽう、ダム下流ではピークカットの結果、増水時の掃流力が低下しているため、掃流できる土砂量に限界があると考えられる。LQ式を用いて、ダム下流において掃流可能な土砂量を評価したところ、布目ダムでは、流入土砂量の60%が上限値であり、生起確率1.75回/年の流量1,000 m^3 では44%、3.25回/年の500 m^3 では30%まで低下することがわかった。これを高山ダム、青蓮寺ダム、比奈知ダムに適用させた結果、ダムの可能最大供給土砂量は50~60%であり、布目ダムを対象に検討してきたものと同様な傾向が得られた。

高山ダムについて、長寿命化と土砂掃流可能性の両観点から妥当な土砂還元量を推定したところ、長寿命化に必要な排砂量は年間60,000 m^3 程度であるのに対して、ダム下流の掃流力から推定される可能最大供給土砂量は84,000 m^3 であり、排砂必要量を掃流できることが分かった。

3.4 木津川本川の流送土砂量の推定

(1) 流送土砂量の過去からの変遷

高山ダムでは1990年前後を境に堆砂速度の変化が見られるので、1990年までの平均の年堆砂速度を求めるとおおよそ150,000 $\text{m}^3/\text{年}$ であった。このうち砂礫成分（<0.075mm以下）を5割とすると、流砂量は80,000 $\text{m}^3/\text{年}$ 弱、木津川本流からも名張川と同じオーダーの土砂量があったことを仮定すると、高山ダム建設以前には、下流へ少なくとも100,000 $\text{m}^3/\text{年}$ かそれを上回る流砂量があったと推測された。木津川下流の掃流土砂量について、江頭ら（2000）ならびに国土交通省近畿地方整備局の推定値を基に累乗の曲線回帰を行った結果、現時点の平均流砂量は2万 m^3 弱に減少したと推定された。木津川においては1960年代から90年代までの間に流砂量が大きく減少し、2000年以降には減少率は小さくなったものの減少が続いていると推測される。

(2) 堰堤直上河床地形観測による流送土砂量の推定

大河原堰堤の堆砂変動量に基づいて期間累積流送土砂量を足し合わせて求められる年間流送土砂量は、2011年に約60,000m³、2012年に約3,000m³と推定された。これは、2011年9月の台風12号および15号による継続時間の長い増水によって、貯水池内が掃流されて大きなポケットが形成されたことと、2012年の出水による流砂量の多くが堆砂したためと考えられた。この間の堆砂量の増分が約25,000m³であったことから、大河原堰堤地点における平均的な流送土砂量は、およそ20,000～30,000 m³の範囲にあると推定された。

(3) 木津川本川の流送土砂量の推定

台風12号と15号の影響があった平成23年において凍結融解度指数から求めた流送土砂量原単位を用いた木津川上流域からの土砂生産量は、163,040 m³/年と推定された。一方、大河原堰堤の2011年の堆砂変動量から全粒径の通過土砂量については45,000m³/年と推定された。実際の土砂通過量は、大河原堰堤に堆積しない細粒分を考慮して、全量をその2倍の90,000 m³/年と推定した。砂州環境評価地点を含む木津川下流の流送土砂量は、本川の90,000 m³/年と大河原堰堤残流域の27,000 m³/年を合計した117,000 m³/年と推定された。いっぽう、河床地形に寄与する粒径集団として砂礫のみを考慮し、その全粒径に占める割合を40%と仮定した場合には、木津川上流域からの平年土砂生産量は65,000 m³/年、大河原堰堤の堆砂測量から推定された平年通過土砂量は20,000m³/年、木津川下流の平年流送土砂量は、大河原堰堤残流域からの6,000 m³/年を併せた26,000 m³/年と推定された。

3.5 河川環境保全のために必要な流送土砂量推定手法の開発

(1) 魚類や底生動物の生息場としてのワンドを好適性と経年変化

砂州上流側に開口するワンドを砂州頭ワンド、下流側に開口するワンドを砂州尻ワンドとして区別し、各ワンドの動物相を比較した結果、コウライニゴイ、ヨドゼゼラ、カワヨシノボリの稚魚、カゲロウ目、トビケラ目の幼虫などの流水性の動物が砂州頭ワンドを、ギンブナ、モツゴ、ヌマエビ、タイリクバラタナゴ、チビミズムシ、ユスリカ亜科の幼虫などの止水性の動物が砂州尻ワンドを愛好することがわかった。

一方、砂州上のワンド個数は、平均比高が2.8-3.7mで、植被率が0.6-0.74で最大化した。すなわち、砂州上にワンドが形成できるようにするためには、水際部分の比高を低い砂州が形成される土砂供給条件

が必要であり、かつ水際にまばらに樹木が生育する程度の攪乱体制が好ましいと判断された。

ワンド数の経年変化から、1980年以降砂州頭ワンドが漸減傾向にあるのに対して砂州尻ワンドは増加傾向にあることがわかった。木津川の生物多様性を高く維持するには、砂州頭ワンドと砂州尻ワンドの両タイプのワンドが存続する必要があるものの、現状においては砂州尻ワンドよりも砂州頭ワンドの数を増やすような対策が求められる。そのためには、水際部分の比高が低い砂州が形成される土砂供給条件が必要である。また、ワンド環境保全のために必要な流送土砂量の目標として両タイプのワンドの個数がバランスよく多かった1979年当時の流送土砂量が妥当と判断された。

(2) アユ産卵場や底生動物生息場としての瀬の好適性と経年変化

アユの成長にとっては藻類生育に適した集中型の瀬が増加する2000年以降、アユ産卵にとっては好適な産卵床条件を提供する横断型の瀬が増加する1990年以降が適していることから、アユの生息環境を維持するためには、20,000～30,000 m³/年の流送土砂量が適していると考えられる。さらに、瀬に生息する水生昆虫の種多様性維持の上では集中型の瀬が存在することが好適であると考えられることから、アユと同様に20,000～30,000 m³/年の流送土砂量が適していると言える。以上検討した複数の種のすべての要請を満足する掃流土砂量は存在しないものの、できるだけ共通部分を多く重ねるためには、30,000～50,000 m³/年の流送土砂量を目標とすることが妥当と考えられる。

(3) 生息場好適性に関わる河床強度と空隙率の評価手法

河床の空隙率は魚類や底生動物などの生息場の質を左右する重要な要因であるが、その時空間的な分布と河床地形や水流との関係、また河床強度との関係など物理・力学特性についても不明な点が多い。現地の砂州で河床空隙量を直接的に評価する手法、また河床強度などから間接的に推測する手法を開発し、実際の野外で空隙率の空間分布を調べた。貫入試験機による初期貫入値から空隙率を高精度に予測できることが分かった。室内において空隙率や河床強度に対する粒径分布や水飽和度の影響を明らかにするため、大型の円筒（径1m、高さ1.5m）を用いた実験を行い、水の充填が増えると空隙率が上がるなどの知見が得られた。また、出水前後の河床変動量の計算から、ハビタットの物理環境として重要なパラメータである河床材料の粒度の形成プロセスを考える場合は、洪水時の河床及び粒度の時間変化も把握しておく必要があることが示唆された。

(4)砂州比高に基づく生態系の評価および必要土砂量の推定1:過去からの定期横断測量を用いた評価

現状の木津川においてタナゴ類やイシガイ類にとって好適なたまりの比高条件から、過去や将来の地形変化を評価する手法として、砂州の面的標高データを比高頻度分布に換算し好適な比高頻度を生息場ポテンシャルとして示す方法を開発した。この手法を用いれば、過去の横断測量データから砂州地形の好適性を定量的に評価することが可能となる。1965年から2010年までの14年分の横断測量データに基づいて分析した結果、木津川の低水路が侵食されて年々狭くなり、低水路から離れた場所に堆積が進むことで、砂州の高低差が増大したことが示された。その結果、好適なたまりの比高0.7-1.5m域の量は、1970年代後半から1990年代前半をピークとする一山型の変化が示された。過去の流送土砂量と比高頻度の関係から、木津川生態系にとって好適な流送土砂量は40,000~80,000m³/年と推定された。

(5)砂州比高に基づく生態系の評価および必要土砂量の推定2:河床変動計算による評価

木津川下流域の河道条件、流況条件、土砂粒径条件を用いて、二次元河床変動計算を行い、流送土砂量の違いが砂州形状や比高頻度分布に与える影響を確かめた。本研究では、流況3パターンと河床粒度分布3パターンの計9通りの設定条件で流砂量に変異を生じさせ、それによって生じた砂州形状を比較したところ、木津川の環境目標である比高が0.7-1.5mの頻度が高まる条件は、流送土砂量が70,000 m³/年で最大化する傾向を示し、逆に1.5-3.5mの高い比高条件の頻度は、流送土砂量が30,000 m³/年以下で最大化する傾向を示した。この結果は、比高が0.7-1.5mの頻度が40,000~80,000 m³/年で最大化する木津川の現象を忠実に再現はしていないものの一定の対応関係は認められた。とくに流送土砂量が減少すると高水敷の比高の被度が増加する点は現実の現象と対応するものであるが、今回の数値計算結果では、粒径が細かいほど高水敷と低水敷の二極化が生じた点は注目に値する。

3.6 河床地形管理の考え方と手法の提案

(1) これまでの河床地形の評価手法

河床地形は、生物の生息場を提供する機能と有機物の捕捉・分解など物質循環を促進する機能を通じて河川生態系の特性を規定している。ところが、これまでの河川環境の評価においては、生物種の量や分布や水質などの生態機能が対象であるために、直接生態機能の整備や管理をしようとする考え方が主流であった。これは、損なわれた生態系の修復に移

植などの手法を検討しがちであることに端的に表れている。いくら生物の個体そのものを守っても、持続的に生育生息することを保証するためには、生息場と生物種間の関係性を管理の対象に加えなければ目的は達成できない。生物群集レベルの生物間相互作用に関しても、各種生息場に対する環境要請にしたがっていると考えられる。したがって、河川生態系の修復や再生を目的とした河川整備・管理においては、河床地形を管理対象として計画することが合理的である。

生息場の基盤となる地形条件に着目した環境評価の手法として、生息場評価法 HEP (Habitat Evaluation Procedure) が知られている。HEPは、米国の自然環境アセスメントで最もよく利用されている手法であり、事業計画とその代替事業について「ノー・ネット・ロス」を前提とした合意形成のために活用されている。このうち、河川の生息場の流速、水深、底質などの評価手法については、PHABSIM (Physical Habitat Simulation Model) が開発され、IFIM (Instream Flow incremental Methodology) による河川の正常流量の評価や設定のために実用化されている (Stalnaker et al., 1994, 中村2000, U.S. Fish and Wildlife Service 1980, 田中1998)。HEP やPHABSIM では、対象生物にとって重要な環境要因の好適性を生息場適性指数 HSI (Habitat Suitability Index) に基づいて関数化することによって、複数の事業計画の影響を比較検討し、代償措置の妥当性を検討するというものである (U.S. Fish and Wildlife Service 1980, 田中1998)。

いっぽう、群集全体の特性から河床地形も含めた環境の現状を評価する手法も開発されて来た。例えば、英国で開発されたRIVPACS (River Invertebrate Prediction And Classification System) (Wright et al 2000) や米国で開発されたIBI (Index of Biotic Integrity) (Karr 1981) は、それぞれ欧州各国や米国では実用化されている。このうち、RIVPACSは、多変量解析によって底生動物群集による河川の分類と環境条件が変化した場合の群集変化を予測するものであり、英国では河川614地点における底生動物群集の種組成予測や人為影響評価がおこなわれている (<http://www.environment-agency.gov.uk>)。日本でも、国土交通省が109の1級水系の河川について5年ごとに河川水辺の国勢調査が実施し、底生動物群集のデータが蓄積されている (建設省河川局河川環境課, 1997) が、それらの情報を環境影響評価に有効利用するための方法はまだ確立されていない (尾澤, 2006)。これらを利用してRIVPACSの日本版を実現するためには、底生動物群集の分類基準を統一する課題、環境条件の対応データを揃える課題、群集

の変異幅をカバーするために支川や中小河川のデータを加える課題などが残されている。

これらの環境評価手法は、いずれも現状の好適性を評価し、環境改善の必要性を検出するためには有用であるものの、環境対策の方途を示さない点に難がある。その理由として、生物種や生物群集の調査を行った地点の環境要因を個別に扱っているために、河床環境の変化と結びつきにくいことが挙げられる。これまでの環境評価法のこのような短所を克服するためには、生物の生息場を規定する環境要因と河床地形が変化する動因とを連携させた環境把握が必要である。

(2) 河床地形管理の基本的考え方

上記のような背景の下で、本研究では、Fig. 4 に示した考え方にしたがって、生態機能からの環境要請をうまく河川管理の手段によって応えることができるような手法を検討した。この考え方では、まず管理目的は生態機能であっても、管理対象を生息場の基礎となる河床地形に設定し、管理手段を「目標とする河床地形が形成維持するために必要な土砂供給条件、流況変動条件、川幅条件」とすることを基本としている。そのためには、図中の下向きの矢印で示されるような因果関係を究明し、逆に上向きの矢印で示されるような予測可能な管理手段を見出すことが求められる。

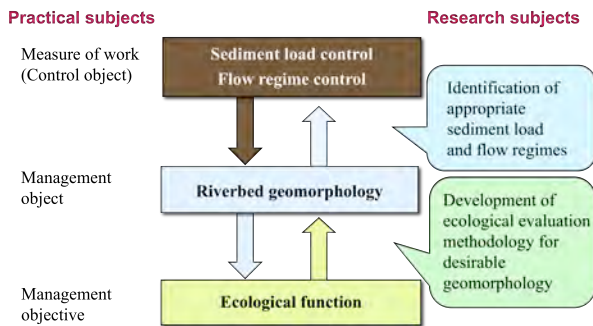


Fig. 4 Scheme of the riverbed geomorphology management based on Habitatology

このような河床地形管理の基本的な考え方にしたがって、管理対象の河川地形を検討する際には、土砂供給条件、流況変動ならびに川幅のそれぞれについて、管理手段としての具体的な測度を決めておく必要がある。本研究では、土砂供給条件については土砂移動量（流送土砂量）と粒径分布、流況変動については洪水流量と頻度、川幅については年最大流量時の流路幅で評価をした。また、河床地形については砂州の比高分布に代表される砂州形状や砂州の位置や瀬の形状といった河床変動計算で扱いやすい

要因に着目した。また、土砂供給条件や流況条件の設定に際しては、流域単位の土砂生産量やダム堆砂等の要因を総合的に評価できるように、流域スケールで検討することを基本とした (Fig. 1)

生息場を好適に維持するためには、流域スケールの長期的な土砂の浸食移動堆積過程を管理する必要がある。そのために、斜面からの土砂生産量の変化を推定して集水域管理に反映させる課題、各集水域から流出する土砂量の変化を推定して支川の河道管理や下流の貯水池管理に反映させる課題、ダム堆砂量の変化を計測して土砂還元適正量を推定する課題、本川の土砂移動量を推定する課題、河床地形（本図では砂州）の生態機能（本図では生息場機能）を評価する課題、目標とする河床地形の形成維持のために必要な土砂移動量を推定する課題を連関させて追究し、一体的に管理の仕組みに活かすことが求められる。

ただし、Fig. 4の課題に関わる過程には長期の時間を要するため、すべてについての最適解が用意されてから事業着手するのではなく、仮説的な方針に基づいて事業を行いながら調査研究によって目標や手法を軌道修正し、順応的に進めていくことが肝要である。本研究では、Fig. 4の図式によって河床地形管理を事業化するための方針を示すとともに、仮説の検証やモニタリング結果を管理にフィードバックするための調査研究手法について取りまとめた。管理に必要な情報を入手するために調査手法は、河床地形管理のための調査手法フローチャート (Fig. 5) に示される。

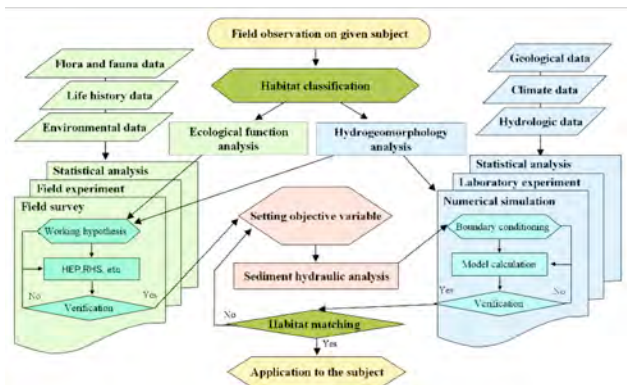


Fig. 5 Flow chart of research methods for the riverbed geomorphology management (after Takemon (2010)).

一方、河床地形管理の考え方と手法を示すために、上記の河床地形管理のための調査手法フローチャートに加えて、河床地形管理手法の概要説明図式 (Fig. 6) を作成した。この図式では、Fig. 5のフローチャートで調査した結果を河床地形管理に活用す

るための手法を説明している。管理の流れとしては、まず河床地形管理の事業対象河道区間について生態機能評価を行い、各種生息場適性モデルを作成する。この図では、木津川砂州のたまりに生息するタナゴ類の例と瀬に生息するアユの例を示している。

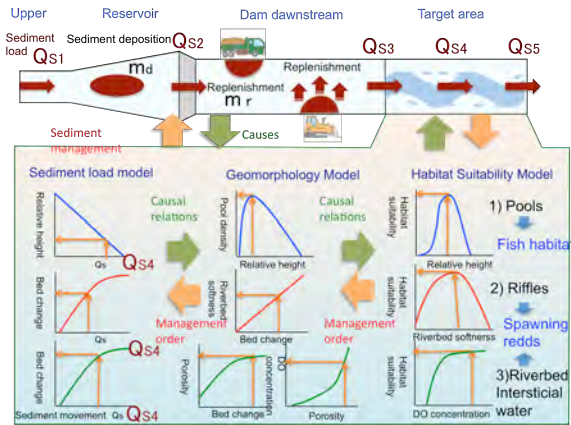


Fig.6 A work image of riverbed geomorphology management.

このように、たまりの局所環境要因に基づくHEPモデルも評価に用いる (Fig.6の右下部分) が、河床地形管理の手法としては、これらを土砂水理条件に翻訳可能な要因による評価関数に置き換える (Fig.6の中央下部分)。その上で、河床変動モデル等の数値計算や過去の地形分析によって、生息場の好適性から判定された河床地形要因の目標値を実現させるために必要な土砂移動量の推定を行う (Fig.6の左下部分)。Fig.6の左下図における3図の砂州比高、空隙率、河床材粒径は、本来は土砂移動量がむしろ説明変数であるが、本図は土砂移動の管理目標を推定することが目的であるため、土砂移動量を敢えて縦軸に示している。河床地形管理においては、この図から推定される土砂移動の必要量を、流域の土砂動態管理の目標値として活用する。

一方、河道の土砂動態管理のためには、土砂移動量 (Fig.6の $Q_{s1} \sim Q_{s5}$) が経時的に把握されている必要がある。土砂移動量の現状と上記の必要量を比較することによって、どれだけの土砂を量供給すれば管理目的を達成できるかを検討することになる。ここで、事業対象河道における土砂移動量については、 Q_{s3} , Q_{s4} , Q_{s5} が異なることに注意する必要がある。木津川下流域 (三川合流点より0-25km区間) の場合には、高山ダム、布目ダム、ならびに各残流域の治山、砂防ダム、堰堤、護岸等の影響により Q_{s3} が減少している。一方、淀川本川の河床掘削の影響によって、木津川下流域 (0-10km区間) の河床低下が著し

い (河川生態学術研究会木津川研究グループ, 2003)。その結果、 Q_{s3} の供給が減っているのに Q_{s5} が促進される結果、 $Q_{s3} < Q_{s4} < Q_{s5}$ となっていると考えられる。本研究の調査結果により、木津川の10-16km区間には比較的まだ比高の低い砂州が多いことが示されたが、この区間の土砂は今後先細りとなることが予想され、河川環境を好適に保つためには、 Q_{s3} の供給を増加させる対策が必要と考えられる。したがって、Fig.6の方法により、土砂供給の必要量を評価することが必須となっている。

本研究で明らかにした、河川環境にとって好適な河床地形条件は、日本の多くの河川で失われつつあるのが現状である。その原因として、河床における土砂動態が低減していることが挙げられる (竹門, 2007)。ただし、環境改善を目的とした土砂移動量の人為増加対策は、人口密度の低い米国では平成23年度の報告書で示したように、数~10万 m^3 のオーダーに達しているが、日本では一部の例外をのぞき未だ試験施行段階にあり、実質的に河床地形を変えるほどの土砂量を投入している例は極めて少ない。このため、野外での実験的なデータから土砂移動量の最適化を研究することが難しい状況にある。したがって、本課題を追究するために現状でとりうる手法としては、土砂供給条件を変えた二次元河床変動の数値シミュレーションによって得られる河床状態から予測する手法と土砂移動量と河床地形の経年変化を生態系機能の変化と比較することによって予測する手法が考えられた。

4 河床地形管理の手法 (木津川の実例)

4.1 木津川における流送土砂量の現状

木津川の河床は経年的に低下の一途をたどっている。これは、上流では木津川ダム群における土砂の捕捉が、下流では淀川本川を中心に行われた河道掘削ならびに砂利採取の影響によると言われている (淀川環境委員会, 2003)。こうした河床低下の履歴からみて、木津川の土砂移動量は経時的に減少しており、今後もさらに減少していくと考えられる。各時代の土砂移動量を推定できれば、各時代の河床地形、生息場構造、生態機能に対応させることによって、木津川の河川環境が良好であった時期の土砂移動量を評価することができると期待される。また、この評価結果を用いれば、将来置土等によって土砂供給の事業を実施する場合に、河川環境の観点から現状の土砂移動量に対してどのくらいの増加をすればよいかについて目安を知ることができると考えられる。

これまでに、近畿地方整備局によって木津川本

川の土砂移動量が試算されている（淀川水系統合土砂管理検討委員会，2010）．本章ではこの試算と本研究の成果に基づいた総合評価を試みた．淀川水系統合土砂管理委員会（2010）の推定方法は，各年の流量，各区間の河道形状と河床材料の粒度分布を境界条件として，過去のダム堆砂量から推定した年平均土砂供給量を条件に，一次元不等流河床変動計算を行うものであり，過去と将来のそれぞれ30年間という範囲について平均移動土砂量を幾つかの条件を仮定して求めている．その際に上流各支流からの土砂流入量については，ダムの年間堆砂量や周辺の比堆砂量に基づき粒径別に土砂供給が与えられ，またダムの建設後はその供給がなくなるように設定されている．この試算によると，木津川16km地点における過去30年間の年平均土砂移動量は，砂・礫成分（ $>0.075\text{mm}$ ）について $27,000\text{m}^3/\text{年}$ と算定されている．さらに今後30年間の予測として約 $10,000\text{m}^3/\text{年}$ を試算しており，木津川上流に建設されたダムによる土砂の捕捉等の影響により1/3程度までの減少を予測している．仮に2010年時点の土砂量を前後の期間の中間の約 $20,000\text{m}^3/\text{年}$ とすると，30年前の1980年には $38,000\text{m}^3/\text{年}$ 程度の土砂量があったことが見込まれる．また，ダムの貯砂量から年間で $30,000\text{m}^3/\text{年}$ の土砂量が捕捉されていると仮定するならば，ダムのない1960年代までには $50,000\text{m}^3/\text{年}$ 程度の移動量があったことも見込まれる．こうしたことからおおまかに区分すると，ダムの影響のなかった1960年代までの $>5\text{万m}^3/\text{年}$ ，ダムに影響を受け始める1980～90年代の $3\sim4\text{万m}^3/\text{年}$ ，土砂減少がだいぶ進んだ現在2010年の $2\sim2.5\text{万m}^3/\text{年}$ ，さらに土砂減少が進んだ場合の $0.5\sim1.5\text{万m}^3/\text{年}$ などの土砂量が想定される．

ただし，淀川水系統合土砂管理検討委員の試算は，高山ダムが建設された1965年以降を対象としたものであり，既に高山ダムによる土砂移動遮断の影響下のものである．このため，1965年以前の土砂移動量は過去30年間お推定値よりもさらに多かったと考えられる．さらに，1965年以前は森林伐採によって裸地面積が多かったため，現在よりの比流砂量自体も多かったと考えられる．これらを加味して木津川の航空写真がある1947年当時の土砂移動量を推測すると，少なくとも $50,000\text{m}^3$ 以上であったと考えられる．これに，高山ダムによる土砂移動遮断の影響と森林伐採による裸地面積の大きかった影響を加味すると，1920～1930年代には大凡 $60,000\sim70,000\text{m}^3$ 程度の土砂移動量があったと見積もられる．また，1920年以前については，むしろ森林伐採の頻度が戦争直前よりは小さかったはずなので，1920～1930年代よりは土砂移動量が少なかったかもしれない．

本研究では木津川本川の流砂量（年平均ベース：砂

礫のみ）をFig.7のように推定した．さらに，全粒径のうちの，河床地形に寄与する粒径集団として砂礫のみを考慮し，ここではその全粒径に占める割合を40%と仮定されている．

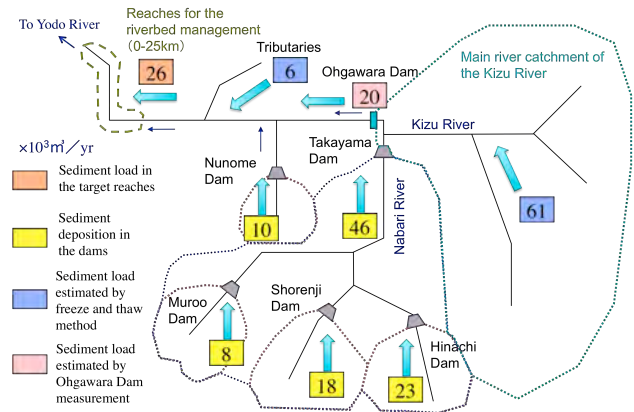


Fig.7 Results of estimation of sediment load in the Kizu River basin. Values represent those of average year base for sand and gravel component, assumed to account for 40% of the total sediment load.

4.2 木津川ダム群からの土砂還元計画

木津川本川の流砂量の推定（年平均ベース：砂礫のみ）を用いて，仮に，高山ダムおよび布目ダムから砂礫分の50%を排砂（高山ダム： 2.3万m^3 ，布目ダム： 0.5万m^3 ）すると仮定すると，Fig.8のような土砂収支を求めることができる．これに伴い，ダムの長寿命化の観点からは，貯水池寿命が500年から620年に，100年後の堆砂率150%から132%に，全堆砂率が20%から17.7%に改善することができる．

一方，河川地形管理の観点からは，例えば，タナゴ類の生息環境の形成維持に最適とされる $4\sim8\text{万m}^3$ の土砂移動量の範囲に合致する 5.4万m^3 の流砂量を実現することができる．なお，このような土砂管理を実現させるためには，貯水池からの具体的な土砂移動手段の確保が必要である．この観点の実現には，今後の技術開発に負うところが多いが，現段階で可能性のあるものを総括するとFig.9のようになる．

ここでのポイントの1つ目は，高山ダムにおける湖上輸送の導入である．これまで議論してきたように，高山ダムの実績堆砂量を考慮すれば，排砂バイパスを検討すべき条件に合致するものの，経済性の観点からは必ずしも最適とは言えない．そこで，その代替として，貯水池上流部に砂礫を効果的に捕捉する貯砂ダムを新設し，そこから，ダム貯水池の湖

面を利用して土砂をダムサイト付近まで輸送する案が考えられる。なお、その後は、土砂を陸揚げし、ダム直下に10,000m³/年、また、大河原堰堤下流に23,000m³/年を供給する。この際には、ダム直下に供給するものは、多少細かめのものを、大河原堰堤下流に供給するものは、多少粗めのものを想定することにより、大河原堰堤湛水池内の過剰な堆積を防止することができるものと考えられる。ここで、湖上輸送を実現させる方策としては、Fig. 10に示すような湖上シャトルによるものや、Fig. 11に示すような特殊エジェクターによるパイプライン輸送によるものなどが想定される。

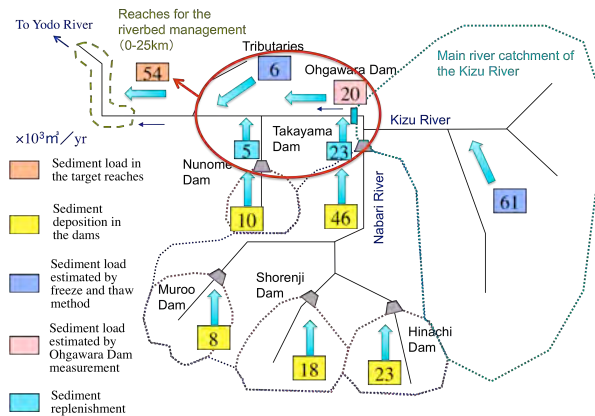


Fig. 8 Results of estimation of sediment load in the Kizu River basin in case of sediment replenishment from Nunome Dam and Takayama Dam. Values represent those of average year base for sand and gravel component, assumed to account for 40% of the total sediment load..

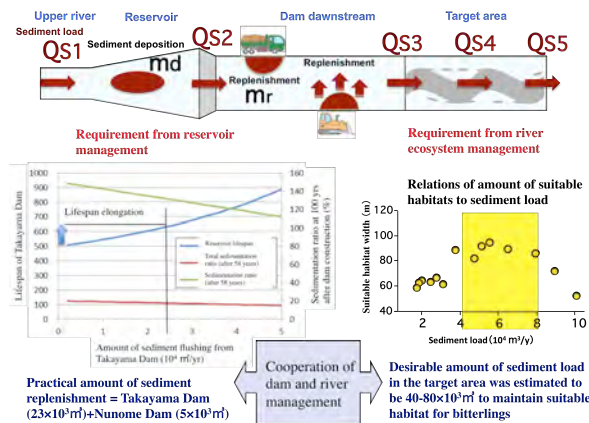


Fig. 9 Prolongation of dam reservoir longevity in relation to the amount of sediment load in the Kizu River.

2つ目のポイントは、布目ダム下流への土砂還元である。布目ダム下流へは、すでに、年間500m³程度

の土砂還元が進められているが、一方で、河道な狭い区間があり、地域住民から土砂量の増加に対する抵抗感が存在する。これに対して、布目川下流区間は、急勾配河道となっており、十分な土砂流下能力がある。そこで、布目ダムからの土砂供給を、ダム直下に1,000m³/年、布目川下流に6,000m³/年のふた手に分けて管理することにより、布目川の河道管理との両立を図ることができるものと考えられる。



Fig. 10 A proposal of sediment augmentation methods for Takayama Dam and Nunome Dam in the Kizu River.

Coarse material shuttle for mainstream dams with lock

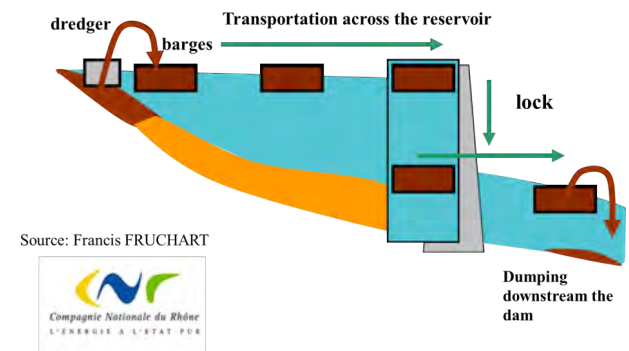


Fig. 11 A proposal of sediment augmentation methods by water surface transportation across the reservoir.

4.3 高山ダム下流の置土に対するフラッシュ放流量の算定

本研究では、木津川・大河原堰堤貯水池を対象として、約2年間にわたる貯水池内の土砂収支の経時変化を明らかにした。そこで得られた貯水池堆砂量の変化と河川流量との関係を、堰堤上流に置き土をした場合に下流へのフラッシュを可能とする流量を算定するための基礎情報として活用することが考えら

れる．具体的には，貯水池内の堆砂量が減少している調査期間において発生した最大流量は，少なくとも堆砂量を減少させることが期待できる流量と考えられ，換言すれば置き土をフラッシュすることができる流量と捉えることができる．これより，置き土をフラッシュするために必要なダム放流量の上乗せ分の算定や，効果的な放流の運用方法の検討などが可能となる．

調査対象貯水池で堆砂量が減少した調査期間は，1，3，4，5および6である．各期間における貯水池堆砂の減少量と期間内に発生した最大流量を整理したのがTable 1である．

Table 1. Relations of peak discharge and amount of sediment load trapped in the Ohgawara Reservoir in the Kizu River.

Period in 2010-12	Sediment deposition (m)	Maximum peak discharge (m ³ /s)	Events in the period
1. 12.27-6.10	-11,200	560	Small spates concentrated in May to June
3. 6.24-7.15	-6,270	100	Short low discharge period
4. 7.15-8.4	-11,600	1,570	A large spate by Typhoon 6
5. 8.4-10.27	-18,600	2,400	Large spates by Typhoon 12 and 15
6. 10.27-1.7	-1,760	130	Long low discharge period

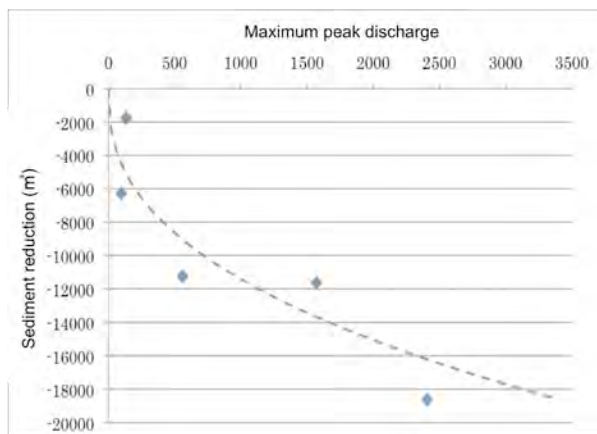


Fig.12. Relations of the amount of sediment reduction in the Ohgawara Reservoir to the maximum peak discharge in the period.

Table 1とFig.12に示した数値を勘案すると，貯水池内の堆砂量，特に中・下流部における堆砂量がある程度確保されている場合には，100m³/s程度の流量でも下流への土砂流出が発生していることが推測される．Fig.12は，Table 1に示した貯水池堆砂の減少量と

最大流量との関係を図示したものである．Fig.12より，堆砂量減少期においては，堆砂の減少量と最大流量との間にはある程度の関係性が認められる．したがって，下流側において期待される置き土のフラッシュ量が決まっていれば，そのために必要な流量を図に示した関係から算定することが可能と言える．しかしながら，(3)に示した結果からも明らかなように，同程度の最大流量が発生しても下流への土砂流出が発生していない調査期間もあり，先述のようにフラッシュ前の貯水池内の堆砂状態が大きく影響することは明らかである．加えて，置き土の配置方法がフラッシュの適否を大きく左右することは言うまでもない．

4.4 河床地形管理の目標像

ヨーロッパの河川の自然再生でお手本とされているタリアメント川は，イタリアでも土砂生産や移動量の多い河川として知られている．ここでは，「健全な河川環境に求められる条件」について，多くの研究が蓄積されており，生物多様性保全の原理として生息場の多様性が重要であることが，広く認識されるようになった．日本でも，多自然川づくりの方針として，「川の営みを活かし」「河川が自らの力で川らしい地形をつくるメカニズムを活かす」川づくりが掲げられ，その実現のための試みが各地で行われるようになった．これまでに明らかとなった「健全な河川環境に求められる条件」を流程スケールの河床に適用するならば，Fig. 13のような河床地形と空間配置を河川管理の目標とすることが望ましいと考えられる．第4章で追究した，タナゴ類や二枚貝類の生息に適した砂州地形条件，アユの産卵に適した河床地形，ならびに有機物の捕捉効率を高める河床地形条件は，いずれもFig. 13に集約された河川地形が健全な河川環境に求められる理由について答えを示したものである．

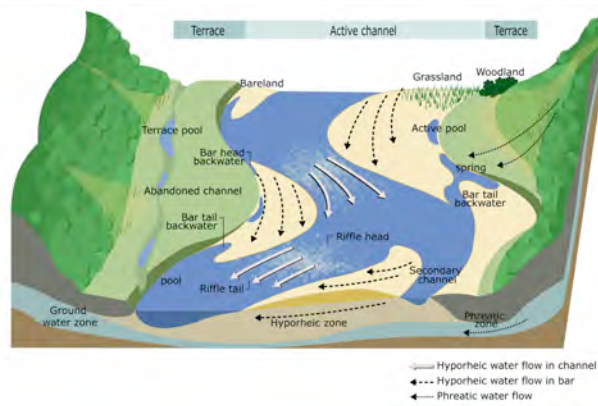


Fig.13. Typical classification of habitat structure in the floodplain reaches in natural streams and rivers.

ただし、そのような地形を目標としたとしても、どのような管理をすれば実現できるかに関しては未だ方法論が未熟であり、境界条件を変えた場合の将来予測をできるだけ定量的な情報やその処理技術が確立されているとは言えない現状である。1997年以降には、応用生態工学会を始めとする学会でも、生息場の構造とその維持のための仕組みに関する研究が盛んに行われるようになっており、今や自然の仕組みを追究する基礎科学としても自然の保全や再生を目指す応用科学としても生息場の特性を動的に踏まえることは当然の時代になりつつあることを踏まえるならば、その方法と技術の開発は、世界的にもニーズの高い研究課題と言える。

本研究の結果、木津川の場合には、イタセンパラやイシガイ類の生息するたまり環境が注目されてきたが、本研究の結果、タナゴ類やイシガイ類にとって好適なたまり環境を提供する砂州地形条件は、1970-1990年の期間に最適であったことがわかった。木津川下流における流送土砂量の経年変化と対応させると40,000~80,000 m³の流送土砂量が適していると判定された。また、稚魚期の生息場として砂州頭ワンドを必要とするコウライニゴイ、ヨドゼザラ、カワヨシノボリにとっても、砂州頭ワンドが多かった1980年前後が目標となり50,000~60,000 m³の流送土砂量が適していると言える。さらに、アユの成長にとっては藻類生育に適した集中型の瀬が増加する2000年以降、アユ産卵にとっては好適な産卵床条件を提供する横断型の瀬が増加する1990年以降が適していることから、アユの生息環境を維持するためには、20,000~30,000 m³の流送土砂量が適していると考えられる。さらに、瀬に生息する水生昆虫の種多様性維持の上では集中型の瀬が存在することが好適であると考えられることから、アユと同様に20,000~30,000 m³の流送土砂量が適していると言える。以上検討した複数の種のすべての要請を満足する掃流土砂量は存在しないものの、できるだけ共通部分を多く重ねるためには、30,000~50,000 m³の流送土砂量を目標とすることが妥当と考えられた。

5. 結論

近畿地方整備局木津川上流河川事務所、淀川河川事務所、水資源機構関西支社木津川総合管理事務所、関西電力、防災研究所技術室の協力のもと事業を進めた。河床地形管理の考え方を、1) 設定した河川環境目標に対して最も適する河床地形条件を明らかにし、2) 与えられた川幅条件の下で適切な河床地形条件が形成維持されるための流送土砂量を推定し環境サイドからの要請を明確化し、3) そのような

流送土砂量を実現するための流況条件や土砂供給条件について、流域ダム管理の要請と照らし合わせて、実現可能な管理手法を提案するものと設定した。

この手法を木津川に当てはめて好適な河川環境維持のために必要な流送土砂量の推定した結果、全対象生物の要請を満足する掃流土砂量には幅があったが、たまり、ワンド、瀬の生息場条件に必要な重複部分から30,000~50,000 m³/年が妥当な目標であると判断された。また、これらの流送土砂量が現状の川幅や地形条件において、生息場の最適化を実現できるかどうかについて、二次元河床変動計算による検証を行った結果、河川環境から提案された流送土砂量の目標値について、ダム堆砂からの移送可能性ならびに置き土をした場合の流送実現性の双方から検討した結果、たまり環境の最適値はむしろ流送土砂量が70,000 m³/年で最大化する傾向を示し、逆に1.5-3.5mの高い比高条件の頻度は、流送土砂量が30,000 m³/年以下で最大化する傾向を示し、必ずしも過去の実験値とは一致しなかった。このため、数値計算による再現性についてはさらに条件を精緻化した検討が必要である。

一方、木津川ダム群の水と土砂の回転率を整理した結果、寿命1000年のダム管理を目指すには、概ね流入土砂量の1/2を排出できればよいと推定された。次いで、LQ式を用いて、ダム下流における掃流可能な土砂量を評価したところ、布目、高山、青蓮寺、比奈知各ダム下流の可能最大供給土砂量は流入土砂量の50~60%であり、長寿命化のための排砂必要量を掃流できることがわかった。木津川における土砂還元計画を検討した結果、高山ダムと布目ダムから年堆砂量の50%に相当する23,000 m³/年ならびに5,000 m³/年が可能と推定され、本川と残流域の流送分を併せて54,000 m³/年まで増加させることができると予測された。

謝 辞

本研究は国土交通省建設技術研究開発助成制度の河道整備・管理に関する技術研究開発「河川環境のための河床地形管理手法に関する技術開発」の一環として実施されたものである。木津川流域の河川やダム貯水池の水理・水文情報や測量データの使用に際しては、近畿地方整備局木津川上流河川事務所、同淀川河川事務所、水資源機構関西支社木津川総合管理事務所、関西電力株式会社、アジア航測株式会社のお世話になった。また、野外調査や室内分析の作業を崔美景氏、寺田匡徳氏、野町和平氏に手伝っていただいた。以上の方々へ心より感謝の意を表す。

参考文献

- 泉山寛明・堤大三・藤田正治 (2011): 裸地斜面の凍結融解強度に積雪および地形特性が与える影響, 水工学論文, 第 55 卷, pp.715-720.
- 小林草平・竹門康弘 (2012): 土砂量と河床材粒径に着目した生息場評価, 京都大学防災研究所年報, 第 55 卷 B, pp..
- 小林草平・竹門康弘・角哲也・富阪和秀・山崎友也, 米田格, 堤大三 (2013): ハイドロフォンによるダム流入土砂量把握の高度化に関する研究, 河川技術論文集, 第 19 卷, pp. 147-152.
- 内藤淳也・角哲也・竹門康弘 (2012): 冷水性淡水魚類生態に適した河川水温環境に関する研究. 京都大学防災研究所年報, 第 55 卷 B, pp. 593-606.
- 野村三奈・浅野和広・武山直史・荒木隆 (2013): 木曾川中流部におけるワンド環境の定量的評価と改善策の効果. 河川技術論文集, 第 19 卷, pp.465-470.
- 角哲也・中島佳奈・竹門康弘・鈴木崇正 (2011): アユの産卵に適した河床形態に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 54 卷 B, pp. 719-725.
- 鈴木崇正・角哲也・竹門康弘・中島佳奈 (2011): 土砂供給に伴うアユ産卵環境の変化予測, 京都大学防災研究所年報, 第 54 卷 B, pp. 711-718.
- 竹門康弘 (2012): 河川の生息場研究の歴史・課題・展望. 水環境学会誌, 第 35 卷 A, 4 号, pp. 110-113.
- 竹門康弘・小林草平・寺田匡徳・崔美景・竹林洋史, 角哲也 (2013): 河川の横断測量データに基づく水面比高分布を用いた生息場評価法, 河川技術論文集, 19, pp. 519-524.
- 富田邦裕・角哲也・渡邊守 (2011): ダムからの排砂と土砂マネジメントによる河川管理の事業評価 -矢作川におけるダムから海岸に至る総合土砂管理の最適化と費用便益評価-, 河川技術論文集, 第 17 卷, pp. 53-58.
- Kantoush, S.A. and Sumi, T. (2011): Sediment Replenishing Measures for Revitalization of Japanese Rivers below Dams, Proceedings of the 34th IAHR World Congress, pp. 2838-2846.
- Kantoush, S.A., Sumi, T. and Takemon, Y. (2011): Lighten the load, International Water Power & Dam Construction, May, pp. 38-45.
- Ock, G. and Takemon Y. (2011): Relation of hydrogeomorphology of gravel bar to particulate organic matter dynamics in braided Alpine river. Disaster Prevention Research Institute annuals, Vol. 54B, pp. 727-733.
- Ock, G. and Takemon Y. (2011): Particulate organic matter retention capacity of braided gravel bar system, Proceedings of International Workshop on Habitatology for linking sediment dynamism and biodiversity: Scientific research project on Tagliamento River (NE Italy), Kyoto, Japan, pp. 87-96.
- Ock, G., Takemon Y. and Sumi T. (2012): Particulate organic matter retention as an ecological indicator for riverbed management. 18th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR-APD 2012). Jeju, Korea.
- Ock, G., Takemon Y., Sumi, T. and Kondolf, G.M. (2012): Ecological significance of riverine gravel bars in regulated river reaches below dams. AGU, 2012, in press.
- Sumi, T. and Kantoush, S.A. (2011): Sediment management strategies for sustainable reservoir, Proceedings of the International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges, The 79th Annual Meeting of ICOLD, pp. 353-362.

(論文受理日: 2013年6月7日)