

・流域物質収支班報告

1. 担当領域

流砂・河床変動および流砂を含む物質収支に対する堰やダムインパクトの評価するためには、流域全体を視野に入れたそれらの取り扱いが必要である。ここでは、これらに関連して、河川整備上の技術的な課題を評価するための方法の現状を紹介する。

2. 注目すべき現象や問題点

2.1 流域規模における土砂流出現象

降雨出水により生産された土砂は、崩壊・土石流、掃流砂、浮遊砂および wash-load の形態で輸送される。これら流砂の量と質の時空間分布の把握は、下流域の物質収支特性及び河床変動特性に大きな影響を与える。また、計画規模またはそれ以上の出水においては、大量の土砂が一度に河道に供給され、河床材料が細粒化するとともに流砂量が増える。このように河道に供給された土砂の粒度は、その後の中小出水で次第に粗粒化し、流砂量は減衰していく。吉野川流域においては、平成 16 年に既往最大流量を記録した出水が発生し、下流域への土砂供給条件に大きな変化が発生したと考えられ、平成 16 年以降の流砂特性について特に注目すべきである。

吉野川流域の地質特性は、中央構造線を境にして南北で異なっている¹⁾。中央構造線よりも北側は、主として和泉砂岩により形成されており、風化されやすい。一方、南側は変成岩であり、主として緑色片岩と黒色片岩により形成されている。このような地質特性の違いによる土砂流出特性の違いにも注目すべきである。

山地域からの土砂流出特性は、山地斜面の森林の状態によって影響を受ける。例えば、吉野川流域は杉の人工林が多い²⁾が、人工林は密生して植えられているため、下草が生えにくく、自然林に比べて土砂流出量が多くなる。また、一つの斜面から一度に樹木を伐採すると、同時期に全ての根が枯れ、斜面が崩壊し易くなる。そのため、森林の状態と土砂流出特性との関係についても注目すべきである。

2.2 河道域における流砂・河床変動

堰やダムなどの河道横断構造物は、流砂の量及び粒度分布の時空間的な変化を介して河床・流路形状及び河床材料の粒度に影響を与える。堰が設置されている地点は、河床低下が発生せず、さらに、流れの堰上げ効果により、堰上流域において土砂の貯留が発生する。その結果、堰上流域の河床上昇とともに、堰下流域において河床低下を発生させる。また、河

床材料の粒度も堰上流域で細粒化、下流域で粗粒化する。ただし、吉野川第十堰周辺については、砂利採掘等による河床低下が顕著であり、現在の河床形状と河床材料の粒度は、このような一般的な傾向を示していないため、注意が必要である。ダム貯水池のような大型河道横断構造物では、ほとんどの流砂がダム内に堆積するため、ダム下流域において河床が低下するとともに、河床材料が粗粒化する。また、支川における砂防ダムや落差工の上流域においても土砂の貯留が発生し、吉野川本川への土砂供給量を減少させている。さらに、河川の河床・流路形状及び河床材料の時空間的な変化は、砂利採掘によっても発生している。国土交通省の砂利採掘許可量³⁾によると、吉野川の直轄区間において昭和40年～平成2年の間に行われた砂利採掘の量は、約22,800,000m³である。一方、同期間の吉野川の国土交通省直轄区間の土砂収支は、約-36,600,000m³であり、河床低下の多くが砂利採掘によるものであることがわかる。そこで、ダムや堰等の人工構造物がある場合と無い場合、砂利採掘を行った場合と行わなかった場合でどのように流砂・河床変動特性が異なるかを把握する必要がある。これらによって、対象としている河川が、現在どの程度の人為的インパクトを受けているかも把握できる。また、将来の流砂・河床変動特性を予測する場合は、ダムや堰などの人工構造物が有る状態、無い状態、さらには人工構造物を改修した場合のそれぞれに対して調べ、将来の流砂の量と質及び河床が時空間的にどのように変化するか把握する必要がある。特に、第十堰の撤去・改修等については、現在、堰の上流と下流の河床位の差が非常に大きくなっており、下流への急激な土砂供給を引き起こす可能性があるため、注意が必要である。また、平成16年の出水時には、支川から本川へ大量の土砂供給があったものと予想される。これらの土砂供給により、第十堰周辺の地形及び河床材料の粒度がどのように変化したか注目すべきである。

2.3 栄養塩の流出過程

流域における栄養塩類の動態を把握しておくことは、第十堰が河川環境に与えている影響を検討する上でのインプットデータとして重要である。ここでは、吉野川流域全体および第十堰周辺域における栄養塩動態特性について述べる。

吉野川流域においては、洪水時に想定される栄養塩動態として、家庭系、工業系からの排出ではなく、畜産系、農業系、そして自然系からの排出が支配的であると考えられる。これは、畜舎周辺から発生する排泄物や土壌に含まれる肥料分の流出が顕著であることを意味する。特に、土砂に吸着した状態で存在するリン、家畜排泄物やリターなどに含まれる窒素の動態を降雨毎にとらえることは重要である。洪水時は河川において輸送される物質の絶対量が非常に大きいので、第十堰の上下流側での栄養塩類の収支は、河川域における生物相への影響評価を検討する際の重要な基礎的データとなる。特に、平成16年に既往最大流量を記録した出水時には、堰上流部では、新たな土砂やリターの堆積や底質の再懸濁などによ

って堰付近における栄養塩環境が著しく変化したことが予想されるので、大きな出水毎に水および底質における栄養塩の計測は欠かせない。

一方、非洪水時では、全ての系から溶存態成分の排出が顕著であると考えられる。人間生活や畜産業に関わる処理水に含まれる窒素やリンの排出や地下水の浸出水に含まれる窒素の動態を、水路や河川内の植生域における吸収や水田における脱窒などの作用を含めた形として日単位でとらえることが重要である。特に、窒素成分は溶存態で輸送される割合が大きく、非洪水時に輸送される割合も土砂やリンに比べて大きいので、その動態に着目する必要がある。第十堰周辺領域では、堰による水の移動形態の変化に伴い堰の上流側では富栄養状態となる可能性があるため、定期的な調査が必要不可欠である。なお、第十堰付近には数十もの観測井があることから、地下水流動も含めた物質動態の検討が可能である。

これらの河川における栄養塩動態は、流域における土地利用や人間活動によって著しく変化する。例えば、徳島県の統計資料⁴⁾を参照すると、農業、畜産業の就業人口の減少に伴い、水田面積および家畜頭数は減少傾向にある。水田は畑地に転換され利用される機会が多くなり、硝酸態窒素の流亡が顕著になり、河川水質にも影響を及ぼす可能性が高い。また、徳島県は平成 17 年に酪農・肉用牛生産近代化計画⁵⁾を発表し、生産の集約化を目標としている。そのため、局所的な負荷の増大が予想され、その規模と位置情報が河川水質への寄与の重要な要素となり得る。また、家庭系や工業系から発生する栄養塩も、人口や事業所の分布の変化に大きく影響される。このように、堰周辺域における栄養塩の流入量の評価や河川における栄養塩負荷の将来予測を行う場合には、社会的動向を加味した負荷源面積の予測が同時に必要となる。そのため、負荷源の種類や原単位の変化を流域のGISとして整理しておくことが課題となる。

2.4 植生、流木、リター

河道内の植生は、貯水ダムによる洪水ピーク流量の低下によって砂州上への流れの攪乱が減少し、草本類から木本類へ遷移している場所も多くみられる。これらの植生の質的・空間的变化は、流れや流砂の時空間分布を変化させるため、その特性を十分に把握しておく必要がある。また、植生域は窒素やリンなどの栄養塩の吸収体として機能するが、流失することによってリター等の有機物の供給源となるので、物質収支を考える上でも大切な因子となる。

平成 16 年の既往最大流量を記録した出水のように、計画規模またはそれ以上の出水で、河道には大量の土砂が供給されるとともに、草本類と幼木は掃流され、成長した木本類の一部についても河岸浸食とともに流送される。裸地となった砂州上には、植生が再び侵入・成長を始め、流砂・河床変動特性を変化させる。このように、出水によるインパクトによって大きく変化した河相が、どれぐらいの時間スケールでインパクトを受ける前の状態に戻るかを

把握することは重要である。

流木については、堰を改修した場合の形状によっては、堰に対する衝突による破損や堆積による洪水流下能力の低下などの問題が発生するため、発生起源や発生量について把握することは重要である。また、ダムによる捕捉や河道内に残された流木の人的除去により、河道及び海域への流木の供給量は減少している。これらが生態システムに与える影響について把握しておくことも重要である。

吉野川河口に形成されている干潟の構成材料には、wash-load 等の細粒土砂やリターなどが含まれる。wash-load やリターは、ダム貯水池への堆積により、河口域への供給量は発生量よりも減少している。また、河道内に植生が多く繁茂している時は、植生域に wash-load やリターが堆積する。一方、植生が一掃されるような出水では、植生域内の wash-load やリターが下流域へ供給されることとなる。このような wash-load やリターの供給量の変化が干潟の形成・維持にどの程度影響を与えているかも把握しておく必要がある。

3. 検討すべき技術課題

3.1 流域規模における土砂流出現象の予測と評価

山地流域における土砂流出現象は、崩壊・土石流、掃流砂、浮遊砂などの流出形態に見られるように極めて複雑である。これらは、流域の地形・地質、植生、気象・水文条件などの自然的条件および流域における土地利用や生産活動をはじめとする人為的あるいは社会的条件に依存することは言うまでもない。さらに、崩壊・土石流の発生については、我々が容易に評価し得ないような条件にも支配されていることを認識しておかなければならない。

土砂流出予測は、ダム堆砂データに基づく経験的方法および水理・水文学的方法を相補的に用いて行われているのが現状である。そのため、崩壊、土石流、地滑りなどの土砂移動現象と地形・地質、土地利用、水文条件などとの関係やダム貯水池及び砂防ダムにおける堆砂と流出土砂の量及び質との関係を念頭にデータの収集整理に努め、予測問題に用いる。生産された土砂は土石流、掃流・浮遊、wash-load の形態で流出する。流出土砂の量および質の特性を予測するには、これらの流砂形態別の評価が可能なモデルとしておく必要がある。また、輸送過程を追跡する際の初期条件とするために、河道の形状ならびに河道内堆積土砂の分布と粒度構成の実態把握をしておくことも必要である。このようにして得られた流出土砂の量と質は、下流域の流砂・河床変動特性を予測するための境界条件となる。

降雨・流量条件には、実測データを用いるとともに、計画規模、またはそれ以上の大出水を含む降雨・流量条件を用い、大出水時における大量の土砂生産とその後の河道堆積物の粗粒化による流砂量の減衰プロセスを再現できるようにする。

3.2 河道域における流砂・河床変動の予測と評価

数十年以上の長期の流砂・河床変動特性を予測・評価するには、1次元河床変動解析を用い、平面2次元河床変動解析は、数洪水程度の短期の流砂・河床変動特性を予測・評価するのに用いるのが良い。流れの基礎方程式は、非定常流れによるものが望ましい。河道横断形状は、非定常流れや植生繁茂に対応できるようにするとともに流砂量を適切に見積もるため、1次元解析においても一般断面形状とする。流砂形態は、掃流砂、浮遊砂、そして wash-load を考慮し、河床材料は混合砂として扱う。

流量条件には、解析上流端付近の実測データを用いるとともに、計画規模、またはそれ以上の大出水を含むハイドログラフも用いる。下流端の水位は、可能な限り、実測水位データを用いる。また、吉野川河口域では、台風の通過時に洪水流量と高潮のピークが同時生起する可能性が高いため、下流端が河口付近の場合は、洪水ピーク流量と高潮のピークが同時生起する条件も含めた解析が必要である。土砂供給量および給砂の粒度は、3.1のような方法により、山地域からの流出土砂の量と粒度を予測し、それらを用いる。解析上流端付近の浮遊砂や wash-load の濃度や粒度のデータがある場合は、それらを用いる。河床材料の粒度は、砂州上や水際だけでなく、流路内においても採取し、解析に用いる。植生については、航空写真、レーザー測量、現地観測などの成果を用いて密生度と植生高さを調査し、解析に用いる。

3.3 栄養塩の流出過程の予測と評価

栄養塩のモニタリングには、浮遊砂や wash-load の計測に用いられる濁度計などの汎用的な機器は少なく、採水および実験室での分析によって計測されるので、流域内の動態を検討するためには多大な労力を要する。そのため、着目している第十堰周辺領域への栄養塩流入量を検討するためには、解析モデルを用いた評価・予測技術の援用は欠かせない。栄養塩の予測手法には多くの手法がある。最もシンプルな予測手法に L-Q 式がある。河川において輸送される負荷量を流量のべき乗の関数で表現したものであり、観測によって得られた流量と負荷濃度から係数が決定される。

L-Q式では負荷の排出源の特定が難しく、人口や土地利用の遷移などに対応した流出量の変化を明確に表現することはできない。そこで、各種土地利用から排出される負荷量を原単位として試算し、その量をタンクモデルなどの流出解析モデルに組み込む方法^{例えば⁶⁾}が広く用いられている。

さらに、近年では、窒素の形態変化および動態を現象に即して表現する分布型物理モデルも多く開発されている。例えば、土木研究所において開発が進められている水循環モデルに、WEPモデル(Water and Energy transfer Process Model)⁷⁾があり、窒素の動態を組み込んだ形で検証が進められている⁸⁾。また、米国農務省で開発されたSWAT (Soil & Water Assessment Tool)⁹⁾は、流域の水循環、栄養塩、農薬等の水および物質の循環を各項目の現象に即した形で表現されている。さらに、SWATは汎用的なGISデータと連携して計算可能であり¹⁰⁾、欧米を中心

とした世界中の多くの流域へ適用されているが、日本への適用事例は無い。このように、栄養塩の物質収支に関する現状把握および将来予測に用いる分布型物理モデルが現在利用可能であるので、吉野川流域でも今後積極的に活用することが望まれる。

以上の流域規模の解析結果を境界条件として、堰周辺域の比較的小規模領域における物質の移流拡散機構や生物活動による代謝作用も取り入れた詳細な栄養塩動態解析技術を適用することで、適切な環境評価や影響予測が可能になる。

3.4 植生、流木、リターなどの予測と評価

植生は、粗度、または流水に対する抗力として評価し、植生域内の流砂は有効掃流力を用いて算定する。植生の時空間的な変化を予測できるだけの知見は、現時点では得られていないが、解析方法の妥当性を検証するために過去のある時期の河床変動特性の再現計算などを行う場合、期間内の植生の繁茂状態の変化は実測データを用いて考慮するのが望ましい。流木の発生起源（山地起源なのか河道起源なのか）や量については、ダム貯水池における流木貯留のデータや河道内植生の変化等から把握するのが良い。また、倒伏した流木の流下および堆積の過程などの流達過程の評価も必要である。リターの発生過程は、供給源の植生分布や発生量、そして流達過程の把握が必要となる。これらの植物体の流出過程の予測技術は十分に発展している段階にはなく、時空間的な分布変動に関する調査や各流出過程のモニタリングが不可欠である。

参考文献

- 1) 建設省徳島工事事務所: 吉野川流域水害地形分類図説明書、1995.
- 2) 熊谷幸三: 吉野川流域における森林整備の方向について、吉野川、創刊号、11-31、1997.
- 3) 国土交通省四国地方整備局徳島河川国道事務所提供資料より
- 4) 徳島県 県民環境部 統計調査課: 2005 年農林業センサス 農林業経営体調査結果概要（概数値）- 徳島県 -、2005.
- 5) 徳島県 農林水産部 畜産課: 徳島県酪農・肉用牛生産近代化計画書、2005.
- 6) 加藤亮、黒田久雄、中曽根英雄: 分布型モデルによる浄化型湿地の配置と窒素負荷除去量の評価、農業土木学会論文集、235、43-50、2005.
- 7) 末次忠司、河原能久、賈仰文、倪広恒: 都市河川流域における水・熱循環の統合モデルの開発、土木研究所資料第 3713 号、2000.
- 8) 賈仰文、木内豪、吉谷純一、戸嶋光映、倪広恒: WEP モデルと組み合わせる分布型汚濁負荷流出モデルの構築と検証、水文・水資源学会 2001 年研究発表会要旨集、44-45、2001.

- 9) Arnold, J.G., A. Williams, R. Srinivasan, B. King, and A. Griggs: SWAT, soil and water assessment tool. Temple, TX 76502. ARS, USDA, 1994.
- 10) Arnold, J.G. and N. Fohrer: SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrol. Process.* 19(3), 563-572, 2005.