水工学諸問題における混相流科学の視点*

Overview of Multi-Phase Flow in Hydraulic Engineering Issues

道 奥 康 治**
MICHIOKU Kohji

Abstract A paradigm for river management was shifted after a legal reform of the river act in 1997, where preservation and mitigation of natural environment became an essential engineering issue in addition to flood control and water use. After then, multi-phase flow researches in river engineering have tremendously changed their direction from hydrodynamics to ecohydraulics that is an integrated engineering disciplines consisting of hydraulics, ecology and biochemistry. Hydraulic engineers are required to develop engineering management tools of river ecosystem that is one of most critical issues for our sustainable life in the next era. There is a wide range of hydraulic engineering disciplines that are closely related multi-phase flows found in issues from disaster mitigation to preservation of nature. In this article, hydraulic engineering researches in the last decades are briefly overviewed focusing on multi-phase flows in a river system.

Keywords: Hydraulic Engineering, Ecosystem, Sedimentation, Self-purification, Water Quality

1. はじめに

水工学・河川工学分野における混相流としてすぐに連想されるのは、流砂現象であろう。言うまでもなく河川流は水と土砂からなる固液混相流であるが、それは洪水時に逆巻く川の濁流からくるイメージであり、平時の川の様子からは連想されるものではない。河川工学はそれほどに災害科学の色彩が濃い技術分野であり、今日も気候変化によって激化する河川災害を緩和するための研究が鋭意進められている。日本混相流学会が設立された 1987 年当時、水工学における混相流研究の主流は土砂水理学にあり、河川工学は治水と利水に供する技術分野であった。

水・土砂災害を軽減するために、河川の疎通能力を増加させダムなどの貯留施設を建設してきたが、これによって河川本来の営力は失われ、水質・生態など水環境システムがダメージを受けた。国の経済成長と社会の反映を第一目標に据えてきた先進諸国のほぼ全てが、河川管理上の同じ過

ちを犯し、現在、全世界で共通の河川工学的問題を抱えている。

日本では 1997 年に河川法が改正され、自然環境の保全が治水・利水とともに河川管理の内部目的に位置づけられ、河川管理のパラダイムが大きく変更された。その結果、今日の河川工学は防災・減災に加えて、自然営力を回復し河川環境を再生するための環境システマ的研究の比重が増しつつある。

水工学には、河川工学だけではなく漂砂・海岸地形や碎波などの混相流を取り扱う海岸工学や反応系混相流が介在する水環境工学など様々な分野が含まれており、水工学全分野の研究の歩みを本小論で網羅することはできない。限定的で包括的になるが、河川流域を対象とする技術・研究の歩みを概観したい。

2. 河川流域に拡がる混相流現象

Fig. 1 は河川流域に拡がる混相流素過程をあら

* 2012.8.1 受付

** 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1
TEL: (078)803-6056 FAX: (078)803-6069 E-mail: michioku@kobe-u.ac.jp

わす。水・土砂・栄養塩などの物質は、流域を枠組みとする気圏－水圏－地圏を経由し循環する。

水蒸気は大気中のエアロゾルを核として凝結し、雨滴・雹（ひょう）・霰（あられ）など固液相の降水をもたらす。短期的・局地的な豪雨による水害が頻発する近年においては、雲物理に基づくレーダー雨量観測や高い時空間能の気象・降雨予測が求められている。

降水は表面流・地中流を形成し、流域から土砂・有機物・栄養塩・金属など様々な物質を下流へ輸送する。これらはいずれも自然環境を形成する重要な因子であるが、人間の営為活動が流域に展開される現在、人類にとって有害な環境負荷や自然災害をもたらす要因にもなっている。

山間地では、降水が土砂や栄養塩を生産して下流へ供給するとともに、様々な形態の土砂災害を誘発する。これらは河川中の土砂輸送と同様に、土粒子と流水が形成する固液混相流である。河川中の流砂過程においては、液相の水理特性が支配的であるのに対し、山地流域の流砂は地盤・地質など固相特性に依存する割合が高い。1980年代頃まで、土砂水理学は治水・治山に関わる土砂生産と河川・沿岸域の土砂移動を主な対象としていた。しかし現在では、改正河川法が目指す河川管理を実現するために、「水系一貫の土砂管理」、すなわち水源から河口まで連続する「流砂系、"Sedimentary system"」の輸送現象として捉え、災

害から自然環境の学理までを包含する広汎・多様な土砂水理学へとバージョンアップした。

地下に浸透した降水は、土粒子と接触しながら空隙を通過し、物理的・化学的交換を通して様々な成分を輸送する。地表・地中の廃棄物や汚染層を経由した地下水は下流域への環境負荷をもたらし、新たな環境問題となっている。

流砂によって形成された河道地形は流動構造を規定する。砂鏈・砂堆（小規模河床形態）や大小様々な砂州（中規模河床形態）が流水抵抗をもたらす。治水のための河川管理だけを考えていた時代において、土砂水理学は主としてこのように河川の疎通能力を評価するための学問であった。しかし、水生生物の生息空間としての河床間隙、砂礫に付着する藻類の生物化学機能、河川の自然浄化機能を決定づける流水表面での酸素交換、魚類の攝餌・休息空間としての瀬・淵など、土砂水理学は出水時に限らず「365日の河川」の環境機能を評価するための学術体系となっている。

弘法大師の時代から、利水・治水を果たすためにかんがい用ため池やダム貯水池が建設され、流域における水・物質収支の特異点となっている。海域と同様、ダム貯水池には水温成層が形成され、様々な水質障害が発現する。水温、光、栄養塩、有機物、酸素、金属などは鉛直方向に層をなし、様々な固液混相流が水質挙動を支配している。貯水池の環境水理学の特徴は、混相流や熱収支な

Fig.1 Multi-phase flow systems in river catchment.

どの物理過程だけではなく、微生物の働きによる化学反応が介在している点にある。特に、「水-堆積層」境界面では、酸化還元状態に応じて栄養塩や金属などが生物化学反応によって交換され、液液混相の化学成層流が発生する。水質障害を緩和するために様々なタイプの曝気循環が実施されるが、施設設計の合理化と管理・運用の適正化のために気液混相流の知見が求められる。

ダム下流では土砂の供給が絶たれて河床が低下するとともに、細粒径の河床材料が失われ粗粒化 (Armoring) が進む。逆に、上流側では堆砂が進み、河床上昇によって河積が減少する。さらに、ダムによる流量制御は本来の流量変動を平準化し、河川のダイナミズムを喪失させる。これによって、河川地形の固定化や陸地化さらに樹林化をもたらす。河床材料や地形の変質・変化は、河川生態レジームを大きくシフトさせる。

治水のための河川改修においては、断面の拡張・浚渫や堤防嵩上げによって洪水時の疎通能力を向上させるため、砂礫の移動が減少し砂州など河川地形が固定される。そのため、ダムによる流量制御の場合と同様に、全国・全世界では河川工事の影響によっても河川敷の陸地化・樹林化が進んでいる。河川内の樹木は洪水時に流木と化して、橋梁や井堰などに滞留・累積し、流れがせき止められて越水氾濫の原因となっている。こうした河川の治水・環境管理には、土砂水理や植生水理などの固液混相流が重要となる。

このように河川流域では人工化が進み、自然が多く失われてきた。そのため、「多自然川づくり」を目指して、石礫や木材・植生など自然素材を用いた河川構造物が一般的になってきた。さらに、構造物が流れや地形、生態系におよぼす影響を計測しながら、修正を加える順応的河川管理を実現するために、河道内樹林や透過型構造物の水理に関する研究の需要が高まっている。

河口部では海水が遡上し、河川によって輸送されてきたシルト質の細粒土砂は、海水の電気化学的中和作用によってフロックを形成し、河床に沈降する。河口部のシルテーションは河積減少や航路埋没の要因となる物理化学的固液混相流の問題である。かんがい・水道用水の取水問題を解決するために、1960-70年代には河口密度流の研究がさかんであったが、その後、多くの大河川に河口堰が建設され、今日では塩淡水密度流の研究はか

なり減少している。

ダムや砂防堰堤の建設に加えて、大量の川砂利採取によって上流からの土砂供給が絶え、全国のほとんどの海岸では侵食が進み砂浜が大幅に後退した。本文では、海岸工学を対象としていないが、当然のことながら海岸線の動態は流砂系の帰結である。そのため、国は平成10年より流域の源頭部から海岸までを一貫で捉え、総合的な土砂管理を実施することになった。すなわち、水-土砂の混相流を流域規模で取り扱う方向へと河川管理の基本方針が大きく変更された。

3. 降水形成の混相流科学

局地的集中豪雨による水害が頻発しており、避難・水防活動を確実にするために、降水の局地情報をリアルタイムで伝達し、気象の正確な短期予測を実現することが喫緊の課題である。水文循環の起点は、大気流の中で「エアロゾル-水蒸気-凝結核」が雲・降水を形成する過程であり、高い時空間分解能で降水現象を観測・予測する技術が求められている。

レーダー雨量計はアメダスなど地上観測網と連携して降水の時空間情報を私たちに提供している。現在の降雨レーダーは水平偏波のみを送受信するものであるが、ここ数年、水平・鉛直偏波の送受信が可能なMP (Multi-Parameter) レーダーによる降水観測へと大きな技術革新を果たしている[1]。XバンドMPレーダーに利用されるXバンドは波長が短く減衰率が高いため計測可能範囲が狭いという欠点がある。しかし、空間分解能が高く雨域の詳細構造を捉えることが可能であるため、局地性豪雨の増加を背景としながら、都市域を抱える河川流域を中心に国土交通省が配備を進めている。雨滴の大きさと形状比との関係が落下中の雨滴の力学に基づいて得られ、MPレーダーの水平・鉛直偏波の反射因子から雨滴形状を介して雨滴の大きさを計測することが可能となる。これは雨滴、すなわち液相の降水粒子に対する計測原理であるが、雹 (ひょう)、霰 (あられ)、雪など固相降水の場合には、粒子径が大きくなっても雨滴のように形状が扁平にはならず、雨滴とは異なる「大きさ-形状比」間の関係を示す。これを逆に利用すれば水平・鉛直偏波の相関パラメータによって降水粒子の固液相判別が可能となる。このように、XバンドMPレーダ

一は高い時空間分解能で降水の量・質を捉えることができ、局地的豪雨のリアルタイム情報を提供する技術ツールとして更なる革新と普及が期待されている。

よく知られるように、気象庁・防災機関や天気予報会社から提供される情報は、気象観測と数値解析データを統合して作成される。将来的には観測値と数値解析の同化がさらに進展すると思われる、観測技術に匹敵する数値予報技術の高度化が期待される。そのためXバンドMPレーダーのように、固気液特性をも対象として雲物理過程を記述する最新の降水予測モデルの開発が進められている[2]。これらにおいては、エアロゾルを核とする雨滴の初期形成、水蒸気－水滴間の相変化と熱エネルギー授受、降水粒子間の衝突・合体など、雲物理の固気液混相乱流解析がなされている。局地性豪雨の特徴は山岳地形や地表熱の影響を強く受ける点にあるが、最新の解析モデルは対流性・地形性の降水事象を精度よく再現できる[3]。

降水から河川流・地下水流への変換過程は、次のような流出モデルで記述される（「流出解析」という）。

(1) 集中定数型流出モデル：あるまとまった規模の流域の地形・地質を少数のパラメータで包括的にモデル化し、流域の貯留・流送能力を数式化する。流出過程の多くはブラックボックス化されるが、水文・地形情報の少ない流域に適用可能な実用的モデルである。

(2) 分布型流出モデル：流域を細かな斜面群に分割し、斜面要素毎の勾配・粗度・浸透能などの特性を与えて、表面流と地中流からなる流出成分を連続式・運動方程式を用いて実情に合うように忠実に再現する[4]。

後者はより洗練された流出モデルで原理原則に優れている反面、流域諸元、降水データ、など多くのモデルパラメータを要する。現実的には、十分な水文データを蓄積し分布型流出モデルの性能を発揮できる流域が少ないため、前者の集中定数型流出モデルがほとんどの流域において河川管理の主力ツールである。今後は、XバンドMPレーダーを利用した雨量観測と同水準の流出予測や流砂系管理を実現するために、分布型流出モデルの普及が期待されている[5]。

4. 土砂流出における「水／土」混相流

流域からは降雨・地震・火山活動や凍上・融解、風化など様々な原因により土砂が流出する。土砂生産は第四紀と言われる過去 200 万年の時代に隆起・沈降した地域で顕著であり[6]、中部・四国地方など険しい山岳地域では甚大な土砂災害が頻発している。土砂生産は土砂災害や河川環境を形成する重要な因子であるにも関わらず、その混相流機構はあまりにも複雑であるため、未解明な現象が多い。

土石流のように突発的・大規模な流砂形態は、斜面勾配が $12\sim15^\circ$ 以上の急傾斜地で発生し、 $4\sim10^\circ$ 程度の領域に堆積する。表面流・地中流の特性、地形、土石・地質特性など、不確定なパラメータに支配されその再現・予測は困難である。しかしこの 20～30 年間、映像技術の進展と観測カメラの整備により土石流の撮影記録が蓄積され、その実態が明らかになりつつある。土石流の研究は一般構成則を得る水準にまで至っていないものの、有用なモデルが提案され、既往の土石流災害が再現されている[7]。河川流中の流砂過程とは異なり、土石流では乱れの影響が小さくレイノルズ応力や乱流拡散は力学モデルに組み込まれない。むしろ、土石流解析においては河床堆積物の侵食・堆積にともなう流動層の質量変化や河床せん断力の評価が重要である。[侵食、堆積]率は、流動層厚さ、砂礫粒径、河床勾配から決まる平衡濃度、土石流濃度の関数として定式化される[8]。また、河床せん断力はクーロン摩擦、間隙流体のレイノルズ応力、粒子の被弾性衝突にともなう内部応力の関数としてモデル化される[9]。

降雨による流域斜面からの土砂生産量は、ダム堆砂量などの観測に基づいて経験的に推測されることが多かったが（例えば、[10]）、累積堆積量に基づく推定であるため、提供される情報は1年あたりの生産土砂量に限定されていた。しかし特に近年、土砂災害対応だけではなく河川環境因子としての流砂の適正管理が求められており、出水事象毎の土砂生産量を評価する必要性が高まっている。分布型流出モデルを用いれば、斜面・河道要素毎の表面・地中流を記述することができる。すなわち、河川の土砂輸送と類似の力学モデルで土砂の掃流・浮遊過程を記述し、これに侵食・堆積を加えれば、流域斜面毎に土砂流出量の時系列が推定される[5]。

以上では表土層からの土砂流出を対象としているが、2011 年台風第 12 号による紀伊半島各地での山腹崩壊、2005 年宮崎豪雨災害における耳側流域の土石流、2009 年の台風 MORAKOT（台風第 8 号）による台湾高雄県的小林村の壊滅[11]など、「深層崩壊」による土砂災害報道が急増している。深層崩壊は第四紀の地域で発生することが多いが、特に近年、豪雨の先鋭化とともに顕在化している。表層崩壊は厚さ 0.5~2.0m 程度の表層土だけが基盤層境界に沿って滑落する小規模の崩壊であるのに対し、深層崩壊は移動範囲が深層地盤にまで至る大規模崩壊であり、被害規模は表層崩壊よりもはるかに大きい。前述の台風 MORAKOT では小林村全村が深層崩壊に襲われ、400 名以上が犠牲となった。地質・地盤条件によっても異なるが、深層崩壊は総雨量が大きい場合に発生しやすいと言われている。

Fig. 2 には深層崩壊が発生した時点での累積雨量 $\Sigma r_t \Delta t$ と時間雨量強度 r_t との関係を過去の代表的な災害事象に対して示している[12]。雨が降り止んでいても累積雨量が 400mm 以上に至ると深層崩壊が発生している。しかし、深層崩壊は地形・地質・地下水構造などにも影響され、Fig. 2 のように降水特性だけで決まるものではない。概念的には Fig. 3 のように $(\Sigma r_t \Delta t, r_t)$ の組み合わせがある閾値を超えると、深層崩壊が発生するがその限界曲線は地域毎に異なる。現在できることは、地域毎に過年度の災害資料を収集して深層崩壊条件を推測し、Fig. 3 上に $(\Sigma r_t \Delta t, r_t)$ の履歴（「スネーク曲線」）をプロットしながら深層崩壊の発生可能性を予測する程度である。このように、深層崩壊の予測評価に関しては、混相流科学の片鱗すら反映されていないのが実態であり、深層崩壊機構の科学的解明にはまだまだ時間を要しそうである。

5. 河川流における混相流の課題

5.1 河川改修が残した負の遺産

1980 年代までの土砂水理学は、河川の疎通能力を設計・管理するために、河道地形の変化や河床抵抗の水理機構を解明することを目的としていた。すなわち、洪水の安全な処理（治水）と安定取水や舟運・水面利用（利水）など、河川流の量的管理の研究に限定されていた。その間、河道の拡張・浚渫、堤防嵩上げなどの河川整備やダ

Fig. 2 Rainfall intensity r_t and rainfall accumulated depth $\Sigma r_t \Delta t$ recorded when the deep-seated landslide occurred [12].

Fig. 3 Criteria of the deep-seated landslide and a hysteresis curve of rainfall intensity r_t and its accumulated depth, $\Sigma r_t \Delta t$, i.e. "Snake Curve".

ム・砂防堰堤・河口堰などの横断工作物によって流れや流砂現象が変質し、河川環境は大きく損なわれた。これは、河川技術者に限らず、経済至上主義をイデオロギーとした成長社会の責任と言える。手遅れながら河川環境を再生する方向へと河川整備戦略が転換され、治水・利水に供する技術として培ってきた土砂水理学は、河川環境修復のための知識・技術体系として新たな使命を担っている。

河道地形は、流れの緩急や水深変化を創出し、播餌・繁殖など生活を営む水生動物や水辺植生のハビタートを形成する。河床材料は藻類の付着基質や魚類・水生昆虫の食資源・住空間を提供する。藻類から水草に至るまで、全ての植物は水中の栄養塩を吸収して炭酸同化作用により水中へ酸素を補給する。植物が生成した酸素と、乱流による水面再曝気で供給される酸素はともに、水中の有機物を分解し河川の自己浄化機能を発揮する。

しかし、人の手が加えられた全国・全世界の河川は、過去の誤った河川整備の後遺症に苦悩している。元々、河川は自らの力に応じて土砂を運び

地形を維持しており、流量見合いの土砂が上下流方向に均衡しながら流送され、河川地形の平衡状態を保ってきた（動的平衡）。しかし、流域（氾濫域）に展開された人間の生産活動を洪水・土砂災害から守るため、砂防・治山によって土砂流出を抑制し、最大流量を基準に河川断面を決め、ダムにより流量変動を平準化した。河川という入れ物を大きくしたのに加えてダムで洪水流量を押さえ込んだために、河床や地形の攪乱能力や攪乱頻度は低下した。加えて流量とバランスしていた土砂供給量は減少し、国内のほとんどの河川では河床が低下し続けている。このことは全国で海岸侵食が進んでいることから容易に理解できる。さらに、高度経済成長期に建設資材として砂利採取も河床低下と海岸侵食を加速させている。

5.2 河道の樹林化

中下流部での草本・樹木の繁茂は全世界共通の深刻な問題となっている。河川の掃流力に見合う土砂が流域から供給されていた時代には、河床や砂州は活発に動き、砂礫で覆われた"White River"の状態であった。しかし、河川の人工化によって砂州が固定・陸地化し、草本・樹木が繁茂する"Green River"へと植生レジームがシフトした。河川の樹林化は、(i) 河川疎通能力低下（流水断面阻害と流体抵抗増加）、(ii) 流木の生産、(iii) 生態系の単調化、という治水・環境上の障害をもたらす。

河道が樹林化する主な要因としては、

- ①ダム操作の流量平準化による河川敷冠水頻度の低下
- ②河川改修や低水路の自然低下にともなう「高水敷－低水路水面」間の標高差の増加
- ③河道内樹木の伐採利用の減少

があげられる。

③については十分な学術研究がなされていないので、その影響は不明である。しかし、①と③の影響が全くない河川でも明らかに樹林化が進んでいることから、②は河川共通の樹林化要因といえる。

河川地形がそれほど改変されていない時代においては、Fig. 4のように砂州は適度な攪乱を受け、護岸は切り立つことなく水際遷移帯と多様な生態系が維持されていた。しかし、洪水処理能力を確保するために河床の浚渫や拡幅で流水断面積を増加させると、平時の水位が下がって「砂州

Fig. 4 Changes in ecological and fluvial regimes caused by river restoration.

Fig. 5 Discharge necessary for submerging the floodplain Q_f in Kako River [14].

表面－水面」間の標高差（比高）が増大し、砂州の冠水頻度や土壌水分は減少する。その結果、陸地化・植生繁茂が進む。この状態では、多少の出水があっても砂州上の植生帯内では流速が低減するために、細粒土砂が砂州上に堆積して比高がさらに増加する。このように、樹林化⇒細粒土砂堆積⇒比高増加⇒流水攪乱低減、という樹林化を加速する「負のスパイラル」が働く。河川の樹林内の地表面は細かい砂に覆われているのに、さらに掘り下げると、旧河道を覆っていた粗い砂礫が必ずあらわれる。このように、疎通能力を増加させるために河川を改修したにも関わらず、樹林繁茂と土砂堆積によって改修前よりも流水断面積がむしろ減少するという皮肉な結果があらわれている。

治水工事の河床掘削に加えて、土砂供給量の減少にともなう河床低下も樹林化を促進する。高

畑・泉[13]は、非平衡状態にある砂州の線形安定解析によって、低下（侵食）傾向の河床は安定で砂州生成が低調であることを理論的に証明した。すなわち、全国の河川で砂州が固定化し植生が繁茂する傾向にある要因の一つが、土砂供給の減少にともなう河床低下であることがわかる。

以上のように人為的あるいは自然起源の河床低下は、砂州を固定し比高を増加させる。その結果、砂州は流水攪乱を受けにくくなり、そこに生息する植生が流亡する頻度を低下させる。Fig. 5は樹林繁茂が著しい加古川河口から約30km上流までの6断面を対象に、砂州が冠水するために必要な流量 Q_f の過去約40年間の変化をあらわす。29.0kmの2006年以降を例外として、全断面で Q_f が経年的に増加している。なお、29.0kmにおいては、2004年台風第23号水害の復旧のために河川敷を掘削し比高が増加したため Q_f が増加した。1947年当時の航空写真を見ると、当該区間は植生が全く見られない砂礫河川であったことから、砂州冠水頻度の減少が樹林繁茂を促進していることが理解される[14]。

河川を対象とした植生水利の研究は1970-80年代より始まった。当初は、アシなど可撓性の抽水・沈水植物を対象として、植生の揺動と流れの相互干渉や乱流・抵抗特性に関する基礎研究が中心であった。その後、河道内樹林の拡大とともに治水上の疎通障害や伐採管理の問題が健在化し、植生水利の研究は、草本植生を対象とした基礎水理学から樹木を対象とする河川工学の課題へと推移した。現在では、樹木の成長特性や倒伏・流亡も視野に入れ、水理学から応用生態工学に至るまでの研究が進められている。実務面ではこれまで、河道内樹林を断面阻害要素あるいは粗度要素として便宜上取り扱ってきたが、樹林内の透過流、「樹林部—主流部」との質量・運動量交換を考慮した水理解析の精緻化が必要である。

土砂など物体固相の混相流とは異なり、樹木の大きさ・形状と水位に応じて流水抵抗は変化し、樹種、密生度と生長段階に応じて間隙率が変化するなど、樹林化河川の混相流には生態学的視点が必要である[15-17]。また、河川の攪乱効果を利用した樹林化抑制や流木生産量の評価を目的とする場合には、樹木の破断・倒伏・転倒や流失の限界条件を知る必要がある。破断・倒伏・転倒は流体抗力の倒伏モーメントによって、流失は樹木周

りの河床せん断力によってそれぞれ評価されることに着目し、樹木の消長モデルが提案されている[17]。なお、水位が樹冠より高い場合には、樹林内透過流と樹林上の越流層からなる二層流が形成される。樹木抵抗を単に流体抗力で記述するのではなく、樹林帯近傍の二層流構造を考慮した平面二次元二層系の洪水流モデルも開発されている[18]。

5.3 河道の土砂水理学

前述のように、土砂水理学の河川環境における役割が大きくなっている。近年、土砂水理学の研究は進展し、数値解析コードや河川地形のレーザー測量などの技術革新は、平面二次元・三次元の河床変動解析を可能にし、河川の土砂管理に供する技術ツールを提供している。

これまでの土砂水理学では、流砂形態が次のように分類されてきた。

《Bed Material Load》

①掃流砂：土粒子が転動・滑動・跳躍しながら河床上を移動する流砂形態。

②浮遊砂：河床から浮上・拡散した土粒子が流水中を浮遊・沈降しながら移動する流砂形態。

《Wash Load》

その近傍の河床材料ではなく、上流域の山腹斜面で浸食された細粒径の土砂が河床材料と交換することなく水中を浮遊輸送される流砂形態。

しかし、近年の研究によってWash Loadにも河床材料との交換があることが見出され、貯水池・河口域のように流速の小さな区間では、Wash Load成分が堆積するなど、流砂材料の起源だけで浮遊砂輸送とWash Loadを区別することは難しいことが判明した。一方、混合砂礫河床の非平衡土砂交換の解析も可能となり、浮遊砂を普遍的に取り扱うことができるので、浮遊砂とWash Loadを区別する必然性が失われた。江頭は、土砂起源によらず、粒子濃度が一樣になる程度の細粒土砂成分（粒径0.1mm以下程度）であれば、河床との交換はなく、これをWash Loadと考えるべきであるとしている[19]。このような研究動向を反映し、現在の河川計画ではWash Loadという用語を用いず、掃流砂、浮遊砂（混合型、通過型）という二つの分類を設定している[20]。

通常、河川の流砂現象と土石流は個別の現象として取り扱われる。土砂輸送の起動力は、前者に

Fig. 6 Ecological cycle in a eutrophic reservoir [27].

Fig.7 Correlation between concentrations of chlorophyll-a and total phosphorus [27].

において流水（流量）であり、後者では重力が支配的となる。しかし、これらは全て流砂混相流であり、[重力、流速、濃度]条件の違いによって流砂形態を変えているにすぎない。したがって、流砂の関連因子を全て組み入れた普遍方程式系が完成すれば、土石流からシルテーションに至るまで、上流から河口域に至るまで、シームレスな土砂解析が可能なはずである。このように土砂水理学の素過程を統一的に記述する試みは、水系一貫の流砂系管理の目指す方向とも整合し、今後の進展が期待される。

混相流科学が著しく進展したため、要素技術を統合して[乱流モデル、三次元、非平衡流砂、粘着・非粘着性材料、混合粒径、分級過程、etc.]のフル装備モデルを完成すれば流砂問題は万事解決すると思われるがちである。しかし、河川は上下流方向に長く水平に比べ鉛直スケールが極端に小さな偏平水域であること、表流水と地中水の混在が流域規模で広がっていること、土砂生産量、水文量（流量、水位）の時空間情報、地形・地質、地盤特性など解析に必要な情報がほとんど整備されていないこと、など不確実で複雑な系であり、装置系の流体解析とは著しく事情が異なる。したがって、プロジェクトの目的・用途に応じて解析系を単純化し、得たい情報だけに限定した近似解析を実施することが一般的である。特に、土砂水理学には流動機構が未解明の素過程が多く、重点的に研究を進めなければ、近似解析すら不可能な場合が多い。流砂現象の重点課題を例示すれば以下のようなものである。

(1) 河川構造物周辺の三次元的流動と土砂移動

水制、横断工作物、分合流の周辺では流れの三次元性が卓越し、局所洗堀が進行する。非平衡流砂を考慮した三次元の流れ・土砂輸送の解析が必要である。特に、多自然川づくりでは、石礫・木材など透過性の自然素材を使うことが多く、透過性構造物の水理特性を合わせて検討しなければならない[21-24]。

(2) 粘着性土を含む土砂水理

日本の河川では砂礫が河床材料の主成分であり、ほとんどの沖積地河川では非粘着性土の取り扱いが可能である。しかし、前述のように Wash Load との材料交換をとまなう河床、細粒粘土が堆積する貯水池や感潮部の流砂現象、粘土が河床材料に混在する東南アジア河川などを対象とする場合には、粘着性土の水理学的知見を集積しなければならない[25, 26]。

(3) その他

流れ・流砂の一体解析、常射流混在流れの河床変動、LES や粒子法などを利用した土砂輸送解析など、鋭意研究が進められている。

6. ダム貯水池とその周辺の混相流水理

日本のほとんどの河川にはダムが建設され、治水・利水に利用されている。しかし、流水をせき止めて大きな人為作用を河川に与えているため、治水・環境面で次のような障害が発現している。

6.1 富栄養化（有機汚濁）

Fig. 6 のように上流域から土砂や栄養塩が供給され、アオコなど藻類が増殖する。次々に生まれては死滅する藻類（有機物）は深層への沈降過程で腐敗し酸素を消費する。貯水池では水温成層が

形成され、その密度境界面（躍層）で上下層の水質交換が阻まれる。その結果、深層への酸素供給は断たれ、深層は有機物分解による酸素消費のために貧酸素状態に至る。深層では還元反応によって栄養塩や鉄・マンガ、場合によってはヒ素などの重金属が底泥から溶出し、メタンガスや硫化水素が発生する。

以上のように、富栄養化にともなう水質汚濁は、

- 植物プランクトンが増殖して異臭味や透明度が低下する表層での水質汚濁
- 酸欠状態に至った深層水の汚染

の二つに類型化される。

湖沼・貯水池では、窒素に比べてリンが相対的に不足することが多く、リンが藻類増殖を規定する制限栄養塩となる。Fig. 7のようにリン濃度とクロロフィルa濃度（藻類に含有される葉緑素で、藻類の量をあらわす指標）には高い相関がみられる。すなわち、リン負荷の大小が藻類増殖—すなわち有機汚濁の度合いを決定づける。河川流中のように酸素が豊富な場では、リンは土粒子に吸着する電気化学的性質がある。したがって、流域からの生産土砂量が多いほど、ダム貯水池へのリンの流入負荷も多くなる。Fig. 8は、国内外の様々な河川で得られた浮遊物質濃度SSとリン濃度の相関関係を総括したものであり、両者に高い相関が認められる[27]。このように、貯水池の有機汚濁度は流域から供給される土砂輸送量に大きく支配されることになる。

有機汚濁対策としては曝気循環工法が有効である。成層化した池内を鉛直方向に混合させれば、光が届かない低温の深層部に藻類を追い込み、成長抑制あるいは死滅させることができる（「光制御」、「水温制御」）。また、曝気循環は、表層の豊酸素水と深層の貧酸素水とを混合させ、深層の酸素を回復させる機能も備えている。ただし、深層が著しく無酸素で金属や栄養塩などを高濃度を含む場合には、鉛直混合方式の曝気循環は硫化水素の拡散や栄養塩浮上にともなう藻類増殖をもたらし、かえって逆効果となる。この場合には、水温成層を維持したまま深層水だけに酸素を供給する深層曝気装置が用いられる。著者らはマイクロバブルを用いた深層曝気装置を富栄養状態の貯水池に設置し、深層における酸素回復、栄養塩・金属の濃度低減に大きな効果があることを実証した[28, 29]。

Fig.8 Total phosphorus TP versus suspended solids SS [27].

Fig.9 Turbidity distribution 10 days after the flood event in Kazaya Reservoir [19].

Fig.10 Time histories of outflow turbidity with inflow hydrograph and turbidity in Kazaya Reservoir [19].

成層化した貯水池の表面に強風が作用すると、吹送密度流によって成層構造が傾斜・変形する（水温成層のセットアップ）。台風で発生する高潮と同様の発生原理であり、水温躍層という内部界面の高潮と言える（内部サージ）。これにより深層の貧酸素水が水面・表層へ湧昇すると青潮や魚介類の弊死を招き、甚大な漁業・環境被害が発生する。水道貯水池にこのような吹送密度流が発

生するとアオコを含む表層水が上水取水口へ混入するために、水道水にカビ臭が発生する。

池内の水質動態は密度流などの水理過程だけではなく、「水-堆積層」境界面での酸素・物質交換、水中の物質の生成・分解など、微生物が関与する化学反応の制御を受ける。そのため、水質解析には、反応系混相流と同様に化学平衡式を連立した物質収支式が用いられる。

6.2 濁水流出の長期化

成層化した貯水池に濁水が流入すると水温成層の浮力効果を受け、Fig. 9 のように出水後 10 日を経ても浮遊土砂が池内に拡がり水温躍層上に高濁度水が滞留する（風屋ダム、[5]）。Fig. 10 からわかるように、ダムがない場合には河川の濁りは洪水流量の低減とともに約 80 時間後に終了している。ダム貯水池によっては、下流河川への濁水流出が数ヶ月にもわたり継続する場合がある。濁水が長期化すると、細粒土砂が魚のエラに詰まって呼吸障害をもたらし、藻類が付着した砂礫上に堆積して草食魚の攝餌障害になるなど、河川生態系に様々なダメージを与える。

冷水害が問題となっていた 1970 年代においては、水温が主な解析対象であった。濁度や栄養塩、酸素などとは異なり、水温は密度流効果によって水平方向に均質な鉛直一次元構造を保つため、一次元モデルでの再現で十分可能であった。しかし、ダム貯水池の環境評価のためには、富栄養化や濁度の解析が不可欠となり、水質化学反応や曝気循環解析モジュールを含む三次元貯水池モデルが開発・利用されている[30]。

6.3 貯水池内の堆砂とダム下流部の粗粒化

風屋ダム（新宮川水系）のように第四紀地形の流域に位置するダムでは、濁水・堆砂がダム管理上の課題となっている。通常、ダム貯水池には 100 年間の堆積土砂を貯留する「設計堆砂容量」が見込まれている。しかし、土砂生産の多い流域では、完成後わずか 10～20 年程度で設計堆砂容量に達し、治水・利水に障害が出始めているダムもある。事例は少ないが、特殊な放流施設を用いてダムに堆積した土砂を一気に排出する「フラッシング排砂」[31]や、ダム基部に常時開放型のオリフィスを設置して洪水時以外には水を貯めない「流水型ダム」など、新たな技術が試みられている。しかし、これら新技術の実績はまだ十分ではなく、持続的管理や適切な計画・設計のために

は、フラッシング排砂や流水型ダムの流砂挙動を再現できるように、非定常・局所的な土砂混相流の精緻な解析が必要である。

ダムの下流域では土砂の供給が絶たれるために、河床材料のうち粗粒成分のみが残されて表面を覆う Armoring（粗粒化）が進行する。これによって河床は固定化し、下流部の河床低下や海岸侵食が進む。ダムによっては流量制御にともなう掃流力低下によって Armor Coat 表面に糸状藻類など環境に好ましくない植生が繁茂する事例もある。ダムのような流砂系の不連続は河川の環境機能を著しく低下させるため、貯水池から浚渫された土砂を下流部へ運搬し、出水時の流送によって流砂系の連続を図る取り組みも行われている[32]。

ダム・井堰を利用したフラッシュ放流は土砂の還元だけではなく、下流の動的平衡と生態系を再生する手段としても期待され、様々な実証実験が取り組まれている[33]。

7. むすび

河川流域の上流から下流に向けて混相流が関わる諸問題を取り上げ、近年における混相流科学的視点を国内外の研究事例に基づいて概観した。河川流域には流砂を中心に様々な固気液混相流が存在しているが、本文で水工学分野の混相流体系全てを整理できたわけではない。本文では著者が触れる機会を持ったトピックスを取り上げたに過ぎない。本文で触れなかった河口・沿岸域でのシルト・粘土のプロキュレーションや再浮上、干潟の土砂・栄養塩収支、飛塩と構造物の塩害、沿岸漂砂と海岸侵食、沿岸防潮林の津波・波浪抑制機能など、混相流科学を活用すべき水工学諸問題は多岐にわたる。水系一貫の河川管理を実現するためには、混相流の知識体系を水工学諸問題へとさらに同化させることが必要である。

参考文献

- [1] Oishi, S., Multiphase Flow in Advanced Weather Radar and Cloud Microphysical Processes, (in Japanese), Japanese J. Multiphase Flow, Vol.24(2) 154-161 (2010).
- [2] Takahashi, T., Cloud Microphysics from Nucleation to Cloud Advection (in Japanese), Tokyodo Publishing, (1987).
- [3] Oishi, S., Kitani, Y., Nakakita, E. and Ikebuchi, S., Numerical Approach on Effect of Topography to Severe Rainfall Using Non-Parameterized Cloud Microphysics Model

- (in Japanese), Annual J. Hydraulic Engineering, Vol.41, 117-122 (1997).
- [4] Sayama, T., Tachikawa, Y., Takara, K. and Ichikawa, Y., Development of A Distributed Rainfall-Runoff Prediction System and Assessment of The Flood Control Ability of Dams (in Japanese), Proc. JSCE-B, No.803/II-73, 13-27 (2005).
 - [5] Apip, Sayama, T., Tachikawa, Y. and Takara, K., Lumping of a physically-based distributed model for sediment runoff prediction in a catchment scale, Annual J. Hydraulic Eng., JSCE, Vol.52, 43-48 (2008).
 - [6] Naruse, H., History of Japan Island (in Japanese), DBS Cosmos Library, Dobun Shoin (1977).
 - [7] Fujita, M., Sediment Disaster and Flood Disasters in Taiwan Triggered by Typhoon Morakot 2009 (in Japanese), Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.53A, 73-83 (2010).
 - [8] Egashira, S., Itoh, T. and Miyamoto, K., Debris Flow Simulation for San Julian Torrents in Venezuela, Proc. 3rd IAHR Symp. River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, IAHR, 976-986 (2003).
 - [9] Takahashi, T. and Nakagawa, H., Prediction of Flood Hydrograph due to Collapse of A Natural Dam by Overtopping (in Japanese), Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ. No.35B-2, 231-248 (1992).
 - [10] Egashira, S., Miyamoto, J. and Itoh, T., Constitutive Equations of Debris Flow and Their Applicability, Proc. 1st Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, 340-349 (1997).
 - [11] Ashida, K. and Okumura, T., Study on Sedimentation in Reservoirs (in Japanese), Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.17B, 555-570 (1978).
 - [12] Hara, Y. et al., Relationship between Deep-Seated Landslide and Rainfall Properties in Recent Decades (in Japanese), Proc. Annual Conf., Japan Soc. Erosion Control Eng., 8-9 (2011).
 - [13] Takahata, T. and Izumi, N., Linear Stability Analysis of Fluvial Bars with Bed Aggradation and Degradation, Annual J. Hydraulic Eng., JSCE, Vol.55, S_865-S_870 (2011).
 - [14] Michioku, K., Aga H., Kanda, K. and Uotani, T., Impact of River Morphological Changes on Floodplain Vegetation, Proc. 10th Int. Conf. Hydrosience and Eng., CD-ROM (2012).
 - [15] Takemura, T. and Tanaka, N., Flow Structures and Drag Characteristics of A Colony-Type Emergent Roughness Model Mounted on A Flat Plate in Uniform Flow, Fluid Dynamics Research, Vol.39, 694-710 (2007).
 - [16] Yagisawa, J. and Tanaka, N., Flood Wash-Out Conditions of Exotic and Invasive Plant, *Eragrostis curvula*, in Japanese Rivers, Int. J. River Basin Management, Vol.8, 15-24 (2010).
 - [17] Tanaka, N., Yagisawa, J. and Fukuoka, S., Method for Evaluating The Dynamics of Forest in Rivers Considering Two Indices Representing The Breaking and Wash-Out Conditions of Trees on Gravel-Bed Bars (in Japanese), Proc. JSCE-B, Vol.66(4), 359-370 (2010).
 - [18] Michioku, K. et al., H-ADCP Flood Routing and Flow Modeling for Evaluation of Flow Conveyance Capacity in a Tree-Vegetated River Channel, Proc. 34th IAHR Congress, 2878-2885, ISBN 978-0-85825-868-6 (2011).
 - [19] Ashida, K., Egashira, S. and Nakagawa, H., River Morphodynamics for the 21st Century (in Japanese), 265, Kyoto University Press (2008).
 - [20] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Technical Criteria for River Works: Practical Guide for Investigation, MLIT (in Japanese), (2012).
 - [21] Nagata, N., Hosoda, T., Muramoto, Y. and Nakato, T., Analysis of Local Scour around A Spur Dike Using 3-D Mathematical Model Developed with Moving-Grid System and Non-Equilibrium Sediment-Transport Theory, (in Japanese), Proc. JSCE, No.684/II-56, 21-34 (2001).
 - [22] Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T. and Muramoto, Y., Three-Dimensional Numerical Model for Flow and Bed Deformation around River Structures, J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol.131(12), 1074-1087 (2005).
 - [23] Olsen, N.R.B. and Melaaen, M.C., Three-Dimensional Numerical Calculation of Scour around Cylinders, J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol.119(9), 1048-1054 (1993).
 - [24] Uchida, T. and Fukuoka, S., A Bottom Velocity Computation Method for Estimating Bed Variation in A Channel with Submerged Groins, (in Japanese), Proc. JSCE-B1 (Hydraulic Engineering), Vol.67(1), 16-29 (2011).
 - [25] Nishimori, K. and Sekine, M., Erosion Rate Formula of Cohesive Sediment (in Japanese), Proc. JSCE-B, Vol.65(2), 127-140 (2012).
 - [26] Takebayashi, H., Nakamoto, T. and Fujita, M., Sediment Transport Characteristics on Bed with Cohesive and Non-cohesive Materials in Tonle Sap River (in Japanese), Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.52B, 637-645 (2009).
 - [27] Michioku, K., Nutrient-Sediment Loads from Forest Catchment and Its Influence on Lake and Reservoir Eutrophication, Annual J. Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.51, K3-K6 (2007).
 - [28] Michioku, K., Strategy of Water Purification in Dam Reservoirs, Proc. 4th Civil Engineers Conference in the Asian Region, CD-ROM

- (2007).
- [29] Michioku, K., Minagawa, H., Yamada, S., Ikeguchi, T. and Ohkawa, N., An In-Situ Experiment on Oxygen Solubility of Micro-Bubble Aeration in A Eutrophic Dam-Reservoir, Proc. Int. Symp. Dams for A Changing World, 2, 99-104 (2012).
 - [30] Romero, J.R., Antenucci, J.P. and Imberger, J., One- and Three-dimensional Biogeochemical Simulations of Two Differing Reservoirs, Ecological Modelling, Vol.174, Issues 1–2, 143-160 (2004).
 - [31] Sumi, T. and Kantoush, S.A., Integrated Management of Reservoir Sediment Routing by Flushing, Replenishing, and Bypassing Sediments in Japanese River Basins, 831-838, Proc. 8th International Symposium on Ecohydraulics, CD-ROM (2010).
 - [32] Sumi, T., Kantoush, S.A., and Kubota, A., Geomorphic response of rivers below dams by sediment replenishment technique, Proc. River Flow 2010, Braunschweig, CD-ROM (2010).
 - [33] Hamano, N., Watanabe, Watanabe, H. Taki, K., Mama, S. and Seki, M., Flushing Release Experiment and Effect Verification in Nature Restoration Using Weir and Dam on Yasumuro River (in Japanese), J. River Eng., JSCE, Vol. 12, 259-264 (2006).
-