

2015 年度（第 51 回）
水工学に関する夏期研修会講義集

A コース

Lecture Notes of the
51st Summer Seminar on Hydraulic Engineering, 2015
Course A

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会
Committee on Hydrosience and Hydraulic Engineering,
Coastal Engineering Committee,

JSCE
2015 年 8 月
August 2015

2015 年度（第 51 回）
水工学に関する夏期研修会講義集

A コース（河川・水文コース）
総合テーマ：流域管理における防災と環境の対策技術

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
Masaharu FUJITA

A-2 豪雨災害による人的被害

静岡大学 教授 牛山素行
Motoyuki USHIYAMA

A-3 治水・利水・環境の観点からの流域一貫の総合土砂・流木管理

京都大学 教授 角 哲也
Tetsuya SUMI

A-4 河川水系における樹林化傾向・治水安全性の統合的確率評価

芝浦工業大学 教授 宮本仁志
Hitoshi MIYAMOTO

A-5 水防災・水環境に係るモニタリング・モデリング技術の現状と今後の展開

東京理科大学 教授 仁瓶泰雄
Yasuo HIHEI
北海道大学 学術研究員 久加朋子
Tomoko KYUKA

A-6 極端現象が与える流域生態系への影響評価

—降水現象の極端化に伴う流況変化等が河川生態系に与える影響に着目して—

土木研究所 主任研究官 傳田正利
Masanori DENDA

A-7 河川・氾濫原の自然再生—その技術と考え方

北海道大学 教授 中村太士
Futoshi NAKAMURA

A-8 リスクマネジメントにおける環境と防災の考え方

岐阜大学 教授 高木朗義
Akiyoshi TAKAGI

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ため、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ため、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ため、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ため、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

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-2

豪雨災害による人的被害

静岡大学 教授

牛山素行

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2015年8月

豪雨災害による人的被害

Victims caused by heavy rainfall disaster.

牛山 素行

Motoyuki USHIYAMA

1. はじめに

自然災害による犠牲者の軽減には、基礎調査として、犠牲者の発生状況についての客観的な分析が欠かせない。地震災害による人的被害に関しては、その発生状況、発生場所、個人属性などについての基礎調査(宮野ら, 1996; 村上ら, 2001), 外力規模と被害の関係など(呂・宮野, 1993; 宮野・呂, 1995), 様々な角度から分析がなされている。これに対して、豪雨災害の犠牲者に関しては必ずしも十分な検討がなされていない。この結果、豪雨災害による人的被害の発生に関して、ともすれば定性的な解釈や、特定で限定的なエピソードにもとづく問題提起や検討がなされることがある。たとえば、「自然災害の犠牲者は高齢者に集中しているので、災害時要援護者の支援が重要だ」といった指摘をしばしば聞くが、この指摘の根拠は、主に年齢別の犠牲者数の集計値のみにもとづくもので(たとえば国土交通省・気象庁, 2012), 災害時要援護者がどのように、どの程度遭難しているのかといった具体的な検証が十分行われているわけではない。あるいは、「市街中心部の洪水に気を取られていたことにより、周辺部での土砂災害で多くの犠牲が出た」(水俣市, 2008)といった、豪雨災害犠牲者の発生場所などの特性に関わる話が、個別の事例の「教訓」として語られることがしばしば見られるが、豪雨災害犠牲者全体の傾向として定量的に検証されたケースは見受けられない。また、豪雨災害による被害は、あらゆる場所で一様に生じているわけではなく、災害発生の危険性(災害の素因)のある場所で発生する傾向があることが、特に地形学の専門家などによって強調されている(たとえば水谷, 2002 など)。したがって、豪雨時の避難勧告等、人的被害軽減のための対応に際しては、雨量・水位等の実況・予測情報だけでなく、ハザードマップ等の素因に関わる情報を加味した判断が有効と思われるが、このことが行政機関の防災実務者等の常識的な認識となっているとは言い難い。現実には、災害時の教訓を元にした検討の場においてすら、ピンポイントの実況・予測情報の精度向上に対する過度な期待ばかりが語られることがあり、これに対して、素因に関わる情報にも目を向けるべきだとの指摘が行われることがある(国土交通省・気象庁, 2013)。素因に関わる情報の重要性を、災害情報の利用者に理解してもらうためには、豪雨災害による被害(犠牲者)が、具体的にどのような場所で生じているのかを、定量的に示すことも必要であろう。

筆者らはこれらの問題意識にもとづき、ここ数年にわたり、検討事例を増やしつつ、豪雨災害による人的被害(以下では特に死者・行方不明者を犠牲者という)の発生状況、属性等に関する定量的・実証的な解析を進めている(牛山, 2005; 牛山・國分, 2007; 牛山, 2007; 牛山・高柳, 2010; 牛山ら, 2011; 牛山・横幕, 2013; 牛山, 2015)。これら一連の研究の目的は、豪雨災害の犠牲者の傾向について、個別的・定性的に語られていることを、系統的・定量的に検証することにより、豪雨災害による犠牲者を軽減する上で特に注意を向けるべき人的属性、場所、時間などを明確にすることにある。

2. 調査手法

利用資料は、これまでの筆者らの研究で用いている 2004 年以降の豪雨災害による犠牲者のデータベースである。この資料は、新聞記事、各種文献、インターネット上の公的機関の文書などの検索を中心に、主要

事例については現地調査結果を加味して筆者が構築しているものである。データベース収録対象の犠牲者は、総務省消防庁がホームページ上で「災害情報」として公表している災害事例別の被害状況に収録された事例のうち、台風、大雨に係る事例による犠牲者である。なお、犠牲者の発生形態が大きく異なることから、航行または停泊中の船舶沈没に伴う犠牲者については除外している。本報で集計対象としたのは、2004～2014年の42事例、712人である(表1)。

犠牲者発生場所の人口については、2005年国勢調査の結果を利用した。また、地形情報については、国土数値情報の土地分類メッシュを利用した。

表1 調査対象事例

事例名(消防庁資料名)	死者・行方不明者	事例名(消防庁資料名)	死者・行方不明者
2004年		2009年	
平成16年7月新潟・福島豪雨	16	平成21年7月中国・九州北部豪雨	34
平成16年7月福井豪雨	5	平成21年台風第9号	27
平成16年台風第10号、台風第11号	3	2010年	
平成16年台風第15号と前線に伴う大雨	10	平成22年梅雨期(6月11日以降)における大雨	21
平成16年台風第16号	13	2011年	
平成16年台風第18号	19	平成23年台風第6号	3
台風第21号と秋雨前線に伴う大雨	26	平成23年7月新潟・福島豪雨	6
平成16年台風第22号	9	平成23年台風第12号	97
平成16年台風第23号	98	平成23年台風第15号	19
平成16年11月11日～12日にかけての大雨	1	2012年	
2005年		平成24年台風第4号	1
北陸地方等の大雨	1	7月11日からの梅雨前線による大雨	32
平成17年7月1日からの梅雨前線による大雨	5	2013年	
平成17年7月8日からの梅雨前線による大雨	6	島根県及び山口県の大雨	4
平成17年台風第14号と豪雨	29	8月9日からの東北地方を中心とする大雨	8
2006年		8月23日から28日までの大雨等	2
平成18年の梅雨前線による大雨	32	台風第18号	7
平成18年台風第13号と豪雨	9	台風第26号	43
2007年		2014年	
平成19年7月5日からの梅雨前線及び台風	5	台風第8号及び梅雨前線の大雨等	3
台風第9号による大雨・暴風	3	台風第12号及び台風第11号	6
東北地方の大雨	4	8月15日からの大雨等	8
2008年		8月19日からの大雨等	74
平成20年7月28日からの大雨等	6	台風第18号等	7
平成20年8月5日の大雨	5	台風第19号等	3
平成20年8月末豪雨	2	合計	712

3. 結果

3.1. 原因外力による犠牲者分類

まず基礎的検討として、外力別の犠牲者数を示す。豪雨災害による死者・行方不明者の発生原因の分類法は確立されていない。筆者らは、特に豪雨に関する災害情報と人的被害の関係を検討する観点から、これまで何回か検討を経て、原因外力については表2のように定義してきた。なお、「洪水」と「河川」の違いを要約すると、「洪水」が河道外に溢れた水に起因する犠牲者で、「河川」は河道内の水に起因する犠牲者である。この定義に従い、得られた情報を元に筆者自身が判定している。分類定義はなるべく明快にしてはいるが、当然分類者の主観が入る場合もある。

原因外力別犠牲者数を図1に示す。最も多いのは「土砂」で348人(48.9%)を占める。以下「洪水」(18.4%)、「河川」(19.1%)と続き、これらで全体の8割以上に達する。「洪水」と「河川」は言い方を変えると溺死者である。溺死は浸水によって生じているイメージが持たれるが、実際にはそのような遭難形態は「洪水」のみであり、溺死者の半数程度である。なお、沿岸近くでの外力ではあるが、高潮による犠牲者は「洪水」に含んでいる。これは、河川起因の洪水と高潮起因の浸水を厳密に切り分けることが難しいためである。ちなみに、今回の期間中では高潮起因の可能性が高い犠牲者は4人であった。

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-3

治水・利水・環境の観点からの流域一貫の
総合土砂・流木管理

京都大学 教授

角 哲也

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2015年8月

治水・利水・環境の観点からの流域一貫の総合土砂・流木管理

Comprehensive Basin-Scale Sediment and Woody Debris Management from the Viewpoint of Flood, Water Resources and Environment Management

角 哲 也

Tetsuya SUMI

1. はじめに

流木による災害については、これまでも種々の対策がとられてきたが、近年、局地的な豪雨が増加傾向にあり、平成 23 年の台風 12 号に伴う紀伊半島を中心とする深層崩壊や那智川の土石流災害、平成 24 年の九州北部豪雨災害、そして平成 25 年の台風 18 号に伴う桂川災害や、台風 26 号による伊豆大島の土石流災害など、豪雨を起因とする流木災害が各地で数多く発生している。

これらの災害は、豪雨の増加に伴う上流域における深層崩壊や溪岸侵食等の増加が原因となっているものと見込まれており、下流域への重要な水源となるダム貯水池においては、流木の除去費用の増大やダム施設への悪影響等が問題となっている。一方で、ダムで捕捉される流木は、下流河川において橋梁に集積して洪水リスクを拡大させるリスクを未然に防止していることが指摘される（角，谷崎 2007）。平成 25 年台風 18 号時の日吉ダムでは、13,500m³の流木がダムに捕捉されたと推定され、これが桂川下流の例えば嵐山（渡月橋）の被害軽減にも大きな効果をもたらしたものと推定される（角，田中，本間 2013）。

ここで、ダムには洪水調節を行う多目的ダムや発電などの利水専用ダムなどさまざまな形態があり、洪水時のゲート操作、流木捕捉用の網場の設置の有無が大きく異なり、近年では、黒部川の連携排砂のような一時的な貯水位低下や、流水型ダムや排砂バイパスのような新たなダムの形態が存在し、これらが流木の捕捉や流出に与える影響については十分に解明されていない。特に、排砂では流出する流木の処理が大きな課題となっている（石川 2014）。

一方、全く違った観点からは、流木流出は流域から海域への炭素供給源として物質循環を担っている事実や、河道内に堆積した流木がさまざまハビタットを形成して生物多様性に貢献している事実など、生態系の面からの重要性を指摘する報告もある（Seo, Nakamura ら 2012）。

以上のように、流木流出現象については、平成 9 年より本格化してきた「水系一貫の総合土砂管理」と同様に「水系一貫の総合流木管理」として体系化することが求められる時代と考えられる。

このような背景のもと、平成 26 年 10 月 3 日に京都大学防災研究所において、流木の流出、災害、生態機能、ダム管理、河道管理の各課題の現状を整理し、学際的な議論と今後の総合管理に向けた方向性を明らかにすることを目的として、「流域一貫の総合流木管理に向けて」と題する研究集会が水資源環境研究センター主催のもと開催された。ここでは、全国のダム貯水池への流木流入の実態と課題整理、洪水時のダム操作方法による貯水池～洪水吐きを通じた流木の流出形態の相違、河道における流木の流下・堆積過程と災害リスク、河道における流木の生態的機能の評価、流域スケールでのマクロな流木流出量の実態把握などについて現状の知見を取りまとめるとともに、今後の総合管理に向けた課題について議論を行った。本稿では、この研究集会で報告された現状の知見を紹介しながら、流域一貫の総合土砂と総合流木管理を進めるための現状の課題および今後の展開について考察する。

2. 流木災害に関する既往の調査研究と研修集会の狙い

(1) 既往の調査研究事例

これまでの流木災害に関する総括的な調査研究としては以下の 2 つがあげられる。

(A) ダム貯水池における流木流入災害の防止対策検討調査（林野庁森林整備部，国土交通省河川局，H19.3）

(B) 流木災害軽減対策と河川樹木管理に関する総合的研究（(財)河川環境管理財団，H20.11）

このうち、(A) の報告書によれば、流木発生メカニズム、流木災害の状況、流木対策の状況が以下のように整理されている。

1) 流木発生メカニズム

【流木の発生原因】

石川 (1994) によれば、流木の発生原因は、大きく「立木の流出」「過去に発生した倒木等の流出」「伐木、原木の流出」「用材の流出」の4種類に分類される(表-1)。立木の流出は、山腹崩壊や土石流による立木の滑落や、溪岸・溪床侵食による立木の流出などがあり、供給源は流域の特性や降雨イベントの状況によって異なることが考えられる。過去に発生した倒木は、過去に病虫害や台風、雪崩などによる倒木であり、過去に河床に堆積した流木なども含む。伐木、原木は、人為的に集積された伐木や原木を指し、用材は、家屋、橋、電柱などの人工物が破壊されることで発生する流木である。なお、流木の発生原因の一つである山腹崩壊と間伐の実施との関連については、間伐により健全な森林を育成し、その健全な森林が持つ崩壊防止力によって崩壊を未然に防止できると考えることができるものの、間伐の実施そのものによる崩壊防止効果は限定的であることが指摘されている。

表-1 流木の発生原因と形態 (Aの報告書より転載) (石川 1994)

流木の起源	流木の発生原因と形態	主な発生場所		
		上流域	中流域	下流域
立木の流出	斜面崩壊の発生に伴う立木の滑落	○	○	
	土石流発生に伴う立木の滑落	○		
	土石流の流下に伴う溪岸・溪床侵食による立木の流出	○		
	洪水による河岸・河床の侵食による立木の流出	○	○	
過去に発生した倒木等の流出	病虫害や台風等により発生した倒木等の土石流、洪水による流出	○	○	
	過去に流出して河床上に堆積したり、河床堆積物中に埋没していた流木の土石流、洪水による再移動	○	○	
	雪崩の発生・流下に伴う倒木の発生とその後の土石流、洪水による下流への流出	○	○	
	火山の噴火に伴う爆風による倒木の発生とその後の土石流、洪水による下流への流出	○	○	
伐木、原木の流出	放置された伐木や間伐材の斜面崩壊、土石流、洪水による流出	○	○	
	集積された木材の洪水による流出	○	○	○
	洪水による椎茸原木の流出	○	○	
用材の流出	土石流、洪水による家屋の損壊とそれに伴う破損材の流出		○	○
	土石流、洪水による木橋の流出		○	○
	土石流、洪水による電柱の流出		○	○

具体的な事例としては、今井、鈴木 (2006) は、2004年7月の福井豪雨における流木の発生形態を以下の4種類(図-1)に分類し、洪水による河床・河岸の侵食による立木の流出箇所(下記の(c))が最も多く、山腹崩壊に伴って立木が溪流や河川まで流出した被害箇所は少なかったことを報告している。足羽川の洪水時の写真を図-1に示すが、河岸に成長した主に杉の立木が大量に存在し、数十年振りの大きな洪水で、そのまま下流河道に流出したものと考えられた。

- a. 溪流の縦浸食に伴う溪岸崩壊：縦浸食による溪床の低下に伴う溪岸崩壊により立木流出
- b. 溪岸の横浸食に伴う溪岸崩壊：溪岸部が浸食され、横浸食に伴う溪岸崩壊により立木流出
- c. 河岸部の横浸食など：河川の河岸部や河床が洪水により浸食され、河岸崩壊などに伴い立木流出
- d. 山腹崩壊：河川または溪流の上部斜面(壁斜面)が崩壊、立木が流出部まで滑落し流出

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-4

河川水系における樹林化傾向・治水安全性の
統合的確率評価

芝浦工業大学 教授

宮本仁志

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2015年8月

河川水系における樹林化傾向・治水安全性の統合的評価

An Integrated Stochastic Evaluation of Vegetation Overgrowth Tendency and Flood Protection Safety in a River System

宮本 仁志
Hitoshi MIYAMOTO

1. はじめに

日本の多くの河川で経年的に進行する河道の樹林化は、河川を管理する上でさまざまな問題を引き起こす^{1,2)}。洪水の流下能力の低下、河川生態系の変質などはその代表例であろう。前者を防災、後者を環境の代表課題とすると、将来にわたる持続可能な河川管理といった観点からは、両者のバランスを的確に評価した河川植生の管理技術が非常に重要となる。

図-1に例示するような、過剰な樹木繁茂へ至る河道の樹林化は、土砂動態の観点からは礫床への細砂堆積、草本の侵入、木本への変化といった植生遷移プロセスが提示されている³⁾。しかしながら、その原因は対象とする流域や河川地先によって諸説さまざまである。上流のダムによる洪水規模や土砂量の減少、河川改修・砂利採取による滞筋の固定化と砂州比高の拡大、河道の富栄養化の進行などが例示されるが、樹林化の統一的な現象理解は未だなされず、抜本的な問題解決には至っていない⁴⁾。

この原因が判然としない河川の樹林化に関して、著者らはこれまで樹林化現象を確率論的に捉え、さらに、流域一貫管理の重要性から河川流域の水系システム上で対象とする河道を位置づけることによって、樹木動態の経年変化が確率評価できる解析モデルを構築してきた⁴⁻⁸⁾。

この植生動態モデルは図-2に示す枠組みで構成される。河川地先の河道断面を対象にしたサブモデル群(①~④)と、河川水系の河道ネットワークモデル(⊙)からなる。前者のモデル群では、樹林化に至る機構を①河川流量、②河川流動、③河床形状、④植生生態の相互作用がおりなす確率過程と考え、砂州上の長期間に渡る樹木消長が評価される。一方、後者のネットワークモデル(⊙)は流域の流量集積特性を①~④の各サブモデルに反映させる役割をもち、植生動態モデルが水系全体に展開される。具体的には、①河川流量の確率過程モデル^{9,10)}が位数的指標のひとつであるリンクマグニチュード¹¹⁻¹³⁾で表現され、任意河道の流量時系列がその



(a) 1947年10月(米軍撮影空中写真(国土地理院))



(b) 2007年11月(国土交通省姫路河川国道事務所提供)

図-1 樹林化の例(加古川: 河口23-24km付近)²⁾

統計特性を保持した形で生成される。

本講義では、この植生動態モデル^{4,8)}により樹木繁茂状況に応じた洪水水位が評価できるため、河川生態系の側面だけでなく、治水安全面も含めた樹林化河道の統合的確率評価手法を講述する。これより、河川水系において治水安全面から樹木管理が優先的に必要とされる河道を抽出する技術を示し、さらに、河道ごとの好適な生態環境・治水安全のバランスに関する議論を展開するための今後の研究・技術開発の方向性に言及する。

なお、本講義は河川樹林化に関する著者らの一連の研究成果を取りまとめたものであり、詳細の内容については個々の論文^{4,8)}をご参照いただきたい。

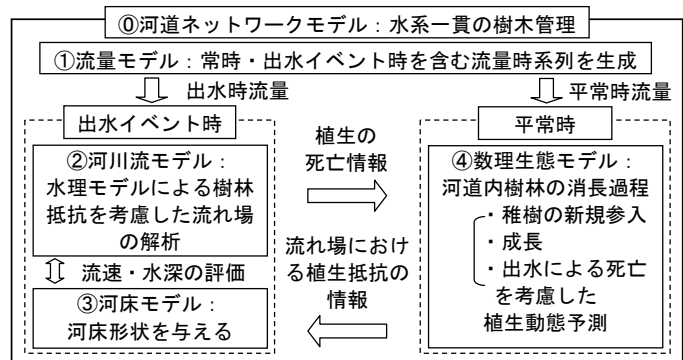


図-2 植生動態モデルの全体的枠組み

2. 河川水系における植生動態モデル

1) 植生動態モデルの全体概要

本講義の植生動態モデルは、出水インパクトの規模やタイミングと樹木消長の兼ね合により顕在化する樹林化/裸地化の程度を確率的に定量評価し、検討対象の河道特性を明らかにするために用いられる。その確率評価は、後述のとおりであるが、植生動態モデルにより生成された数多くの時系列群を用いて、モンテカルロシミュレーションによって数値的に実施される。著者らの検討⁴⁾では、2000パターンの日平均流量を所定の年限(100年間)にわたって疑似生成し、得られる出水水位と樹木繁茂に関する2000パターンの解析結果から対象河道断面における治水・環境両面の統合的確率評価を行った。本講義では、この解析結果⁴⁾を中心に議論を進める。

この植生動態モデルについては、これまで、流量規模や砂州・高水敷の比高など河道特性の異なる加古川の複数地点を対象にして、この植生動態モデルによる解析を行い、砂州上の樹林地/裸地の傾向がよく表現できるモデルであることを検証してきた^{6,7)}。さらに、現地観測で計測された樹木データを用いて植生動態モデルの精緻化を行い、期待値と標準偏差を用いた確率評価を介して現地の樹木分布密度がよく表現されるモデルであることを確認している⁹⁾。

図-2に示す植生動態モデルの全体構成は、上述の1パターンの解析スキームを示したものである。この植生動態モデルは、河川流域全体に対して対象河道のもつ流量の集積特性を数理表現し得る⑩河道ネットワークモデルによって、対象河道における植生動態に関連する①～④の水文・水理・生態過程サブモデルが内包される構成となっている。

具体的な植生動態モデルの実行手順は以下のようである。

- (i) ⑩河道ネットワークモデルにより、河道の位数化手法のひとつであるリンクマグニチュードを用いて対象河道の流量規模が与えられる。
- (ii) その流量規模を用いて、確率過程モデルをもとにした①流量モデルによって河川流量の時系列が疑似生成される。
- (iii) 生成された流量時系列の時間進行に従って、与えられた河道断面において砂州や高水敷が冠水する出水イベント時には、②河川流モデルにより流速・水位や植生の流亡・死滅情報が算出される。
- (iv) その一方で、低水路での流れとなる平常流量時には、④数理生態モデルにより樹木成長や稚樹の新

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-5

水防災・水環境に係るモニタリング・
モデリング技術の現状と今後の展開

東京理科大学 教授

仁瓶泰雄

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2015年8月

水防災・水環境に係るモニタリング・モデリング技術の現状と今後の展開

Advanced Technology of Field Measurement and Numerical Simulation

二 瓶 泰 雄
Yasuo NIHEI

1. はじめに ～もう数値モデルの開発は不要か？～

先日オランダ・ハーグで開かれた36th IAHR World Congressに参加した(2015/6/28～7/3)¹⁾。この会議に参加して、数値シミュレーションによるアプリケーション(応用)研究が非常に増えているのに大変驚いた。それほど過去のIAHRの会議内容に精通しているわけではないので著者が知らないだけかもしれないが、これほどまでアプリケーション研究にシフトしているのも、世界的に使われている数値コード(Delft3D, MIKEシリーズなど)が十分確立・浸透していることや、水工学における数値モデリングの骨格は出来上がったものと認知されているためであると考えられる。

現在、水工学分野を引っ張る大御所・中堅の研究者・技術者の皆さんは、多かれ少なかれ理論研究や数値モデリングに携わり、それらを介して水工学の基礎を徹底的にかつ自然に身に付けていった。一方、現在の若手研究者や学生は、研究を始めた当初から、世界的に使われている数値モデルが(予算さえあれば)いつでも使用できる環境にあるため、それら数値モデルが世界標準であると自然と思い、わざわざ数値モデルを開発しようと思ったり、自ら面倒くさいコーディングを行ったりはしない。また、アプリケーション研究の方が、研究内容が実務と直結していて分かりやすく、“楽しい”ものと思われる。そのため、数値モデル開発に取り組む研究者の層が薄くなっており、特に、若手研究者の取り組みが非常に少ないのが大きな気かりである。

このようなまま現在の若手研究者が中堅以上の指導的立場になれば、この情勢を変えられないところまで行ってしまうだろう。本当に“学問”としての水工学はこのままでいいのだろうか?本当に、現在の世界標準の数値モデルは直すべきところ、疑うべきところが全く無いのだろうか?答えはいずれも「No」であると著者は信じている。数値モデル開発や理論研究無くして、新しい技術革新と水工学分野の発展はありえず、今後の展望も開けない。また、世界標準の数値モデルでも、当然のことながら適用範囲や適用限界があり、解析できない現象も多々ある。これらを実感するために、流体力学・水理学の基礎をもう一度学び、基礎方程式系から見つめ直すのは重要である。

類似の状況は、現地観測手法に関してもいえる。すなわち、汎用的な観測機器の登場により、自らは1ユーザーと化してしまう。ただ、こちらの方は、観測機器そのものの開発に携わる人や、汎用機器の使い方や適用範囲拡張に努める人々が多く存在している。また、ベースとなる流れの計測技術は著しい発展を遂げている一方、実務の現場では昔からの計測手法が標準的に使われているものもある。最近では、安価、小型、自動操縦が可能なUAV(Unmanned Aerial Vehicle, 無人飛行体)であるドローン(drone)を活用した観測技術も登場している。

本稿では、水防災・環境に関わる数値シミュレーション技術や現地観測手法に関する基礎的手法から最新の技術に関して紹介するものである。本テーマは非常に幅広く、著者の力量ではそれらを全てカバーして記述することは難しいので、著者がこれまで経験したものを中心として、今後の水工学を担う若手技術者や学生が知っておくべき内容を取りまとめるものとする。そのため、まず、数値シミュレーション技術における

基礎方程式系を次元別に取りまとめると共に、いくつかの新たなシミュレーション手法について列挙する。水工学に関する防災と環境はとかく別物のような扱いになるが、水の力学（水理学や流体力学）をベースとするため、流れの数値シミュレーションにおける基礎方程式系は同一のものとなる。ただし、計算対象条件により、流れの基礎方程式系を一、二、三次元と変えたり、流れと共に移動する物質の対象を変えたりする。これらは、環境水理部会メンバーとの共著である「環境水理学」²⁾に記述しているので、その内容に加筆したものを示す。現地観測技術として、河川における流量観測手法について記述する。

2. 数値シミュレーションにおける基礎方程式系

2.1 概要

流体運動の基礎方程式系は、水を非圧縮性流体として扱えるので、三次元場の連続式と運動方程式（ナビエ・ストークス方程式）となる。水工学で取り扱う実スケールの河川や湖沼、沿岸海域では、その大部分は乱流場となっている。ナビエ・ストークス方程式のみを乱流場に適用すると、乱れの最小スケールを解像できる計算格子を設定して乱流場を解く DNS（Direct Numerical Simulation）³⁾を行うことになるが、実スケールの河川流などを DNS で解くことはほぼ不可能である。そのため、ナビエ・ストークス方程式をアンサンブル平均したレイノルズ方程式を用い、この平均操作を介して得られたレイノルズ応力項に関して何らかの乱流モデルを導入する必要がある。

また、対象とする流れ場や現象に応じて、流れや物質輸送を考える空間的な次元を三次元から二次元、一次元と次元数を落として数値解析を行うことは一般的である。例えば、河川では、湾曲部や分合流部等における局所的で複雑な流況をターゲットとするときには三次元場を、一般的な洪水流や河床変動シミュレーション、氾濫解析では平面二次元場、上下流の広い区間や長期間の現象を扱う場合には一次元場を、それぞれ選定している。

以下では、流れの基礎方程式（連続式と運動方程式）と物質輸送方程式に関して、三次元場、平面二次元場、一次元場に分けて記述する。なお、主な対象を河川と湖沼とするが、湖沼流で扱うことがあるコリオリ力は含めずに式系を記述する。

2.2 三次元場の基礎方程式

図 1 に示す三次元場（ x, y, z 方向）における連続式と運動方程式を記述する。まず、連続式は、質量保存則（式(1)）から非圧縮性の条件（ $\frac{D\rho}{Dt}=0$ ）の条件を加味した式(2)のようになる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

ここで、 ρ : 水の密度、 u, v, w : x, y, z 方向の流速である。

水工学シリーズ 15-A-6

極端現象が与える流域生態系への影響評価
—降水現象の極端化に伴う流況変化等が河川生態系に与える
影響に着目して—

土木研究所 主任研究員

傳田正利

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2015年8月

極端現象が与える流域生態系への影響評価

-降水現象の極端化に伴う流況変化等が河川生態系に与える影響に着目して-

Assessment on influence of extreme weather on river basin ecosystem

-Focusing on change of flow regime due to extreme weather -

傳田 正利

Masatoshi DENDA

1. はじめに

気候変動の進展は世界的な共通認識となり、気候変動への対応は、科学・技術分野のみならず、行政分野も含んだ世界的な対応が求められる課題である。また、気候変動に伴う極端現象の増加も日本全国において確認されている。河川分野では、降水現象の極端化、それに伴うと考えられる土砂災害・河川氾濫の増加が生じている。

水工学分野では、気候変動に伴う降水現象極端や災害発生メカニズム解明、降水減少極端化への適応策の研究が活発に行われている。また、行政・施策としても、降水減少極端化への対応が検討事項に挙げられている。気候変動、それに伴う極端現象（例えば、降水現象極端化）は、「治水」や「利水」という形で直接的に影響が生じるため対応への社会的要請が高く、研究・技術開発から行政施策まで、幅広い対応が試みられている。

しかし、治水・利水だけでなく「環境」との調和を目指す河川行政にとって、気候変動やそれに伴う極端現象に起因する環境変化への対応が必要となる。環境の中でも水質問題等は利水に影響を与えるため検討が本格化しているが、環境の中でも河川生態系に与える影響については、極端現象と関連して検討されることは少ないと考えられる。この理由は、現在、気候変動や極端現象に伴う河川生態系管理上の問題が指摘されることは少ないためと思われるが、一度、種の著しい減少等の生物多様性に関する問題が顕在化してからの対応では、復元が容易でない生物多様性・河川生態系の特性を考えると、事前の対応が必要となると考えられる。

本稿では、2章において、気候変動・極端現象に伴う河川生態系への影響に関する研究動向を整理し、気候変動・極端現象に伴う河川生態系への影響の研究の方向性を考察する。3章において、河川生態系の構造を改めて分析し、気候変動・極端現象が河川生態系へ及ぼす影響要因を整理する。

次に、4章において、気候変動・極端現象の研究ではモデル研究が多用されるが、気候変動・極端現象が河川生態系へ及ぼす影響予測に有力な手法である生態モデリングを紹介する。また、5章において、生態モデリングを河川工学と融合させ、出水、河川地形変化、植生変化、及び生物群集が連動して変化する河川生態系の特徴を表現した河川生態系変動予測モデルの概要を紹介する。その後、6章において、気候変動・極端現象の増加が河川生態系へ与える影響評価の適用例として、極端現象に伴う流量と水温変化が水生昆虫の生活史に与える影響を評価する事例を紹介する。

最後に、水文学、河川工学及び生態モデリングを結合し、流域スケールでの河川生態系管理、IPCC等で提供される気候モデルの計算結果を活用した河川生態系管理にむけて、今後、水工学で必要となる検討事項を整理し、具体的な生態系管理への応用の方向性を議論することを目的とする。

2. 気候変動に伴う極端現象が流域河川生態系に与える影響の研究動向

本章では、気候変動・極端現象に伴う河川生態系への影響に関する研究動向を整理し、気候変動・極端現象に伴う河川生態系への影響の研究の方向性を考察する。なお、気候変動に関する研究は、自然科学から社会科学までの多岐に渡るが、筆者らの研究蓄積は浅いため、十分に既存研究を網羅していない可能性もあるが、現段階で把握している研究動向を整理する。

まず、気候変動に関する国際的な研究・政策検討などの取り組みといえば、気象学における全球気候モデル(GCM: Global Climate Model)、や気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)の取り組み等を思い浮かべる方が多いと考える¹⁾。国際誌をレビューすると気象学や水文学分野では、GCM、IPCCに関連した気候変動のメカニズムや気候変動が自然・人間社会に与える影響を研究した事例は多数存在する。

気候変動に伴う極端現象が河川生態系に与える研究に関しては、(イ)気候変動に伴う極端現象等の変化が流域スケールでの河川生態系に与える影響評価に関する研究、(ロ)気候変動に伴う極端現象等の変化が特定の生物階層に与える影響を評価する研究、以上の2通りに分類される。(イ)の研究の一例として、Andrew et al.の研究が挙げられる²⁾。Andrew et al.らは、Hadley Centre climate model(HadCM3)を用いて、2080年のイギリスの河川生態系を推定し、暖かい冬季と穏やかな春季は、河畔に生息する鳥類の生息、サケ・マス以外の魚類の再生産を促すが、魚類の病気の発生率の上昇、サケ・マス科の生息地の減少、外来性の大型水生植物・魚類の増加等を促す可能性を指摘している。イギリスの広範囲を対象とし、気候変動に伴う極端現象が河川生態系に与える影響を総合的に評価した事例として、今後の研究に重要な示唆を与える研究である。(ロ)の研究の一例として、Rui et al.の研究がある³⁾。Rui et al.は、Mediterranean riversを対象に、モデルを用いて気候変動に伴う極端現象に起因する流量変化(Flow regime)が、河道内植生に与える影響を検討している。その結果、植生がない区域が拡大し、パイオニア的な植生が減少する可能性を指摘し、河道内植生管理が課題となる日本の河川にも有用な研究成果を示している。

紹介した以外にも、多くの興味深い研究成果があるが、これらの研究に共通しているのは、「モデル」を活用した研究である点である。(イ)はレビュー研究ではあるが文献調査対象の個々の研究は、降雨モデルと流出モデルが連携し、検討項目が多岐に渡る河川生態系への影響分析を行えている点が興味深い。(ロ)の研究は、(イ)の研究に加えて、河川生態系を構成する各生物階層の詳細なモデルでの検討がなされ、より河川生態系管理に近いレベルでの検証がなされている。これらは、河川生態系を「モデル化」することの重要性を示している。気候変動に伴う極端現象(流量変化等)は、未だ顕在化していない現象が複雑な機構を持つ河川生態系に与える影響を評価する点が難しい。この難点を克服するには、複雑な機構を持つ河川生態系の構造の理解、そのモデル化を行い、高精度化したモデルに種々の計算条件を与えて将来の河川生態系像を推定していくことが必要となる。

3章では、複雑な構造を持つ河川生態系のモデル化のため、河川生態系の定義の再確認、河川生態系を特徴づける重要概念を整理する。

3. 生態系の構造と生態系を駆動するもの

(1) はじめに

2章においては、気候変動に伴う極端現象が、河川生態系に与える影響を予測するためには、複雑な構造を持つ河川生態系のモデル化が必要であることを整理したが、その準備として、河川生態系の構造と特性を十分に理解する必要がある。本章では、生態系の定義に立ち戻り、河川生態系の構造と特徴(独自性)を理解するため、その重要概念である「生態系」、「流量変動」及び「河川連続体仮説」を整理すると共に、気候変動に伴う極端現象が河川生態系に与える影響要因を検討する。

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-7

河川・氾濫原の自然再生
—その技術と考え方

北海道大学 教授

中村太士

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2015年8月

河川・氾濫原の自然再生－その技術と考え方

Restoration of streams, rivers and floodplains – concept and technical basis

中村 太士

Futoshi NAKAMURA

1. はじめに

北海道を代表する大河の多くは、かつて大きく蛇行しながら広大な氾濫原を形成した。その結果、扇状地では網状の河道が複雑に発達し、沖積低地では川の周辺に自然堤防が発達した。氾濫原や自然堤防の上にはうっそうとした河畔林や湿地林が生育した。扇状地では伏流水や湧水が湧きあがり、自然堤防背後には、洪水時に雨水が停滞する広大な後背湿地帯が広がった。大径の河畔林にはシマフクロウが営巣し、蛇行した大河にはイトウやサクラマスが棲み、自然短絡した蛇行河川は三日月湖となり、多くの渡り鳥の中継地となった。

こうした北海道の自然河川は、戦後の復興とともに大きく変貌した。特に、1960年代以降の高度経済成長期における農業開発は、北海道の河川そして周りの氾濫原を激変させた。北海道の大河のすべては、戦後の農地開発とともに捷水路工事が実施され、蛇行河川は直線河道に変化した。大河、石狩川本川も、改修前に364km程度あった流路延長は、現在268kmになっており、ショートカットにより約100kmも短くなったことになる。

我が国は、1993年に生物多様性条約を締結し、1995年から4次にわたり生物多様性国家戦略を策定してきた。また昨年は、生物多様性条約締約国会議（COP10）が名古屋で開催されるなど、生物多様性の保全に向けた取り組みが注目されるようになってきた。2001年～2005年にかけて行われたミレニアム生態系評価（MA）は、1000人を超える専門家の参加のもと、地球規模で生物多様性や生態系を評価した。また、2006年、2010年には、地球規模生物多様性概況第2版、第3版（GBO2, GBO3）が公表された。その中では、2010年目標「2010年までに生物多様性の損失速度を顕著に減少させる」は達成されなかったと結論している。

2010年、GBOの日本版であるJBO（日本生物多様性総合評価報告）が発表された。筆者も、この作成委員会に参画した。河川については、1997年の河川法改正、2002年の自然再生推進法の制定にもなって、環境や生態系の保全を目的とした事業が実施されるようになってきた。しかし、評価結果は「湖沼を含めた陸水生態系の状態は、1950年代後半から現在に至る評価期間において大きく損なわれており、長期的には悪化する傾向で推移している。」というものであった。その原因としては、砂利採取、河川改修、湖沼や湿原の埋立て等があげられている。これに加えて、外来種問題が深刻化していることが指摘された。

こうした背景のもと、本論では、近年顕在化している河川生態系と生物多様性の劣化プロセスを、河川構造、流況、流砂系の変化から検討し、その現状の課題と再生の方法について紹介したい。

2. 河川構造の変化と生物多様性

日本が多くの蛇行河川を失った歴史は、近代的な土木技術が発達した明治時代、明治29年の河川法の制定にさかのぼる。それ以前、明治初期の河川管理方法は、オランダ技術に代表される低水工事と呼ばれるものであった。低水工事とは、舟運による物資輸送を可能にするため、また安定して取水や灌漑ができるようにするため、川の水位が低い時期にも滯筋（みおすじ）が乱れないように調節し、安定した水位や水深を確保するために実施される工事のことである。その後、物資の輸送が舟運から鉄道や道路などの経路に変わると、低水工事の重要性が低下し、多発した大河川の氾濫と時期を同じくして、高水工事の必要性が叫ばれるようになった。高水工事とは、洪水時に河川の氾濫をおさえ、河水を一時貯留したり、より早く海まで流したりするように計画された工事のことである。明治29年に制定された最初の河川法

は、高水工事による治水に重点を置いた法整備であり、フランスへの海外留学から帰ってきた若い技術者達によって、築堤を中心とした洪水防御工事が実施され、河川は徐々に直線化されていった。

蛇行していた北海道の河川が、捷水路工事と築堤工事によって直線化され、大きな変貌を遂げたのは、戦後の高度経済成長期、1950~1960年代であろう（図1）。北海道におけるこの時代の捷水路工事は、治水目的の他、河川の両側に広がる泥炭地を乾燥化し田畑として利用する目的もあった。捷水路工事は流路延長を短くし、河床勾配を急にするため、一般的に流速が増大し河床が掘れて低下する。この低下した河床に連動して、周辺地域の地下水位も下がり、農地として利用することが可能になったのである。こうした歴史的背景を経て、日本の蛇行した河川は直線化され、治水の安全度は向上し、周辺地域の集約的な土地利用が可能になった。



図1 標津川における蛇行河川の直線化

一方で、河道の直線化とともに、蛇行河川や氾濫原に依存しながら生育・生息して生物種の多くは姿を消した。かつて、北海道の多くの河川に生息していたと考えられる日本最大の淡水魚イトウは、主に平野部を流れる蛇行河川に生息し産卵もしていたが、直線化とともにほとんどの河川から姿を消した。さまざまな生物種は、蛇行した河川の構造やその水文・水理条件に適応し生存してきた。そのため、直線化によってその環境を失うことは、すなわち絶滅を意味する。

曲がった川と直線の川は何が違うのか。川は曲がることによって、瀬や淵の繰返しを創り出す。多くのサケ科魚類は、淵に生息し、瀬から流されてくる水生昆虫を捕食する。また、淵から瀬に変化する場所では、川の水が一度砂礫に浸透し、伏流水となって再び川に戻る流れが形成される。こうした場所は、サケ科魚類の産卵する場所として機能し、卵が生きていくためには、伏流水によって十分な溶存酸素が供給される必要がある。曲がった川の外側には深い淵が形成され、岸が侵食されることによって川辺の樹木が倒れこむ。倒木の内部には遅い緩やかな流れが形成され、周辺には複雑な速い流れが取り囲み、さまざまな大きさの、そして多くの種類の魚類が生息できるようになる（図2）。

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-8

リスクマネジメントにおける
環境と防災の考え方

岐阜大学 教授

高木朗義

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2015年8月

リスクマネジメントにおける防災技術と展望

—破堤確率と土地利用を考慮したリスク評価に基づく 河川堤防整備の優先順位決定方法—

Disaster mitigation technique and perspective in risk management

高木 朗 義
Akiyosi TAKAGI

1. はじめに

わが国は、災害に対して脆弱な国土をもつ。洪水災害に着目すると、人口の約50%、資産の約75%が洪水氾濫区域に集中している。加えて、日本を流れる河川は規模が小さく、急峻なため、豪雨時には大きな流量が小さな断面に流下する特徴を持つ。また、わが国では梅雨前線の活動による雨季と、台風の通過による大雨など、降雨が集中する時期があり、近年ではゲリラ豪雨と呼ばれる短時間に集中した大雨が頻発するなど、降雨による災害が起こりやすい。以上の背景から、洪水被害を軽減させる河川整備は歴史的に見ても重要視されてきた。しかし、わが国の河川は一級河川だけでも総延長がおよそ8万8千kmと膨大である。また、近年のひっ迫した財政事情により、社会資本整備に充当される予算は縮小してきた。そのため、すべての河川に対して整備を施すのは時間的、予算的に現実的でない。限られた時間や予算のもとで、効率的に整備による便益を具現化するためには優先順位を与える必要がある。現在の河川堤防整備の実務では、流域全体を概略点検し、概略点検で発見された局所的弱部を詳細点検することで堤防整備の実施を検討している。つまり、堤防の強度が小さい地域の堤防を改修することで洪水氾濫による被害の軽減を図っている。しかし、流域に視点を当てたとき、整備の下流域に与える影響を評価する方法が確立されていないため、洪水リスクを最小とするような整備には至っていないことが多い。そのため、現在の治水対策には、土地利用や堤防強度などの地域によって異なる上下流のリスクバランスを考慮した評価手法が必要とされている。

本研究では、破堤を確率事象として捉えるとともに、堤防の強度やその地域の土地利用によって異なる洪水リスクを定量的に評価し、上下流の関係を考慮した堤防整備の優先順位決定法を開発することで、堤防整備が流域に及ぼす影響を示し、流域全体の洪水リスクを最も小さくする治水計画策定方法の構築を目指す。

2. 現状の治水評価と本研究の位置づけ

(1) 現状の治水評価と課題

現在の堤防整備に関わる治水評価は治水経済調査マニュアル（案）¹⁾に沿って行われている。治水経済調査マニュアル（案）では、河川水位が計画高水位に達したすべての破堤地点で「必ず破堤する」という仮定と、「発生降雨に対する最大被害が生じる」という仮定の下で洪水被害額が算定されている。しかし、実現象として河川水位が計画高水位に達したところで必ず破堤するわけではない。計画高水位に達しても破堤せずに越流する場合や達しなくとも破堤する場合が考えられる。さらに、ある地点での破堤を考えたとき、氾濫によって河道流量が減少するため、破堤地点より下流域では発生降雨に対して流量が小さくなる。すなわち、すべての破堤地点で発生降雨に対する最大被害が生じるとは考えにくい。つまり、現行の治水評価は実際の洪水被害に対して過大に評価するおそれがある。ま

た、治水経済調査マニュアル（案）は流域における治水事業実施の妥当性を判断するものであり、堤防整備の優先順位を決定する方法については明示されていない。したがって、従来の堤防整備は過去の被災経験をもとに下流より連続的に行われてきた。その理由として、上流から整備すると、整備した地点で被災する確率が減少するため、下流に大きな流量を流す確率が增大すること、下流域は歴史的に資産価値の高い土地利用をされていることが多く、被災時の被害が大きくなりやすいことがあげられる。しかし、近年になって都市開発が進み、下流域の土地利用も都市の開発地域によってさまざまとなってきている。加えて、我が国の経済状況は流域すべてを整備するだけの余裕はなく、下流域からの連続的な整備にも限界がある。そのため、地域によって異なる土地利用形態および流域における位置関係を考慮した流域全体でみた整備優先順位を与えることが現在の堤防整備に必要である。優先順位の決定には河川水位による堤防の壊れやすさを考慮したより合理的な判断基準に加えて上下流の関係を考慮した評価手法が必要である。

(2) 既往研究の整理と本研究の位置づけ

これまでも不確実な事象である災害を確率的に扱う研究は多く、リスク評価の判断材料である確率の算出方法が議論されてきた。宇野ら²⁾は過去の被災事例からロジットモデルを構築することで河川堤防の安全性を評価する方法を提案している。ここで、宇野らのロジットモデルは破堤確率の算出に天端幅や堤体断面積などの堤防形状にも含まれる被災要因を考慮したモデルであり、被災要因の特定ができる特徴を持つが、実務への適用を考えたとき、地域によって異なる被災要因のすべてを網羅することが困難である。また、要因の選択をする際に有力な要因が欠落する可能性もある。そこで、本研究では破堤を解析的にとらえた松尾ら³⁾や大竹ら⁴⁾の評価方法に着目する。松尾らや大竹らは斜面の安定解析を用いた方法で斜面崩壊に関する安全性を評価している。ただし、松尾らの評価方法は論文が投稿されてから幾何かの時を経ているため、現行の設計基準で考えられていない。加えて、モンテカルロシミュレーション (Monte-Carlo Simulation, 以下MCSとする) のような計算技術が不足していたため、多くの計算を必要とする解析手法を課題としていた。これに対し、大竹らは現行の設計基準のもと、飽和不飽和浸透流解析を基本とした解析手法を提案し、その有効性について示している。以上より、本研究においても大竹らの方法を用いることで破堤確率を算出する。

大竹らは堤防整備の優先順位の必要性も述べており、提案した解析手法を用いることで堤防の局所的な弱部を抽出し、局所的弱部から優先的に整備していくことを可能としている。また、瀧ら⁵⁾は破堤氾濫で想定される流出家屋数と発生頻度の積をリスクとしてとらえ、リスクの大きい箇所から優先的に整備することを評価した。しかし、河川整備の優先順位を考えるときに、整備による上下流への影響を考慮したものはない。そこで、本研究では以下の特徴を持つ堤防整備優先順位決定方法を提案する。1つは堤防の破堤を確率表現することにより、洪水リスクと整備によるリスク軽減量を定量的に評価する。2つは被災によって低減する河川流量を捉えることで、堤防整備が流域全体に与える影響を評価する点である。これにより地形などによって区分されるひとまとまりの氾濫区域（以下、氾濫ブロックとする）の整備による流域全体の洪水リスクの変化を計測して、最も効率の良い整備順位を決定することを可能とする。

3. 優先順位の決定方法