

2013 年度（第 49 回）
水工学に関する夏期研修会講義集

A コース

Lecture Notes of the
49th Summer Seminar on Hydraulic Engineering, 2013
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

2013 年 8 月
August 2013

2013 年度（第 49 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：都市の水防災と河道の維持管理

- A-1 東海ネーデルランド高潮洪水地域協議会について — TNT 危機管理行動計画—
中部地方整備局 河川部 水災害予報センター長 小林克治
Katsuji KOBAYASHI
- A-2 都市域における浸水解析
中部大学 教授 武田 誠
Makoto TAKEDA
- A-3 地下浸水とその備え
京都大学 教授 戸田圭一
Keiichi TODA
- A-4 豪雨災害による人的被害
静岡大学 准教授 牛山素行
Motoyuki USHIYAMA
- A-5 水系一貫の土砂管理について
京都大学防災研究所 教授 角 哲也
Testuya SUMI
- A-6 河川堤防の浸透破壊と液状化
中部大学 教授 杉井俊夫
Toshio SUGII
- A-7 河道内樹林化機構とその制御
岡山大学 教授 前野詩朗
Shiro MAENO
- A-8 中小河川における多自然川づくりの考え方
—中小河川に関する河道計画の技術基準を中心として—
土木研究所 自然共生センター センター長 萱場祐一
Yuichi KAYABA

2013 年度（第 49 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 13-A-1

東海ネーデルランド高潮洪水地域協議会
について — TNT 危機管理行動計画 —

国土交通省 中部地方整備局
水災害予報センター長

小林克治

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2013 年 8 月

東海ネーデルランド高潮洪水地域協議会について

～TNT 危機管理行動計画～

Tokai Nederland Regional Authority against Storm Surge and Flood

～※TNT Risk Management Action Plan～

中部地方整備局河川部 水災害予報センター長 小林 克治

Katsuji Kobayashi

1. はじめに

近年、地球規模での気候変動に伴う異常気象や、大規模な台風、高潮、地震などの自然災害が、日本をはじめ世界各地で頻発している。ここ東海地方では、今からおよそ半世紀前の昭和34年、伊勢湾台風により5,000人を超える死者・行方不明者を出す大災害が起きている。(写真1-1～写真1-6参照)



飛島村と筏川、さらに伊勢湾が見られる
提供：木曾川下流河川事務所 撮影：陸上自衛隊
写真1-1 被災した飛島村付近



十四山村神戸と飛島村の村界付近
提供：木曾川下流河川事務所 撮影：陸上自衛隊
写真1-2 被災した十四山村付近



木曾岬村藤里付近
提供：木曾川下流河川事務所
写真1-3 被災した家屋と電柱



木曾岬村付近
提供：木曾川下流河川事務所
写真1-4 被災した家屋



長島町白鷺付近
提供：木曾川下流河川事務所
写真1-5 揖斐川左岸の破堤した堤防と家屋



最後に仮締切りされ万歳
提供：木曾川下流河川事務所
写真1-6 長島町白鷺の仮締切りの完成

※Tokai=Central Japan facing Pacific Ocean

Nederland=Low land

Takashio-Kozui=Storm surge and flood

平成12年の東海豪雨では名古屋市を中心に大規模な浸水被害が発生し都市機能が長期にわたり麻痺した。

(写真1-7～写真1-9参照)

また、海外に目を転じると記憶に新しいところでは、平成17年にこの地方と同じようなゼロメートル地帯が広がる米国ニューオリンズで、ハリケーン・カトリーナによる大被害が発生している。さらには、今後30年間に、高い確率で南海トラフ巨大地震の発生も予測されている。



提供：庄内川河川事務所

写真1-7 愛知県西枇杷島町の浸水状況

同一地点における平常時と東海豪雨水害時の状況



提供：庄内川河川事務所

写真1-8 平常時（名古屋市天白区）



提供：庄内川河川事務所

写真1-9 東海豪雨水害時（名古屋市天白区）

東海地方は、国内最大のゼロメートル地帯で、まさに堤防に守られた地域である。そこに人口と資産が集積し、わが国最大の「ものづくり」地域となっており、東西の人流や物流が行き交う要所でもある。このような地域に、伊勢湾台風を上回るような高潮・洪水が発生した場合、大勢の人命が失われる可能性があるだけでなく、世界規模で社会・経済活動に甚大な影響を与えることになり、その被害は計り知れない。

平成18年1月に「ゼロメートル地帯の高潮対策検討会」(国土交通省)より、関係機関が設置する地域協議会において大規模浸水を想定した「危機管理行動計画」を策定することが提言されたことを受けて、中部地方整備局では平成18年11月に「東海ネーデルランド高潮・洪水地域協議会（作業部会）（以下「TNT」という。）」を設置した。TNTには、国の地方支分部局や地方自治体(愛知県、三重県、岐阜県、名古屋市、関係市町村)、道路・鉄道等の施設管理者、上水道・電力等のライフライン施設管理者など50機関(オブザーバー含む)の実務担当者が参加しているほか、学術面からの助言などを頂くため、学識者の方々にファシリテータとして参画頂いている。

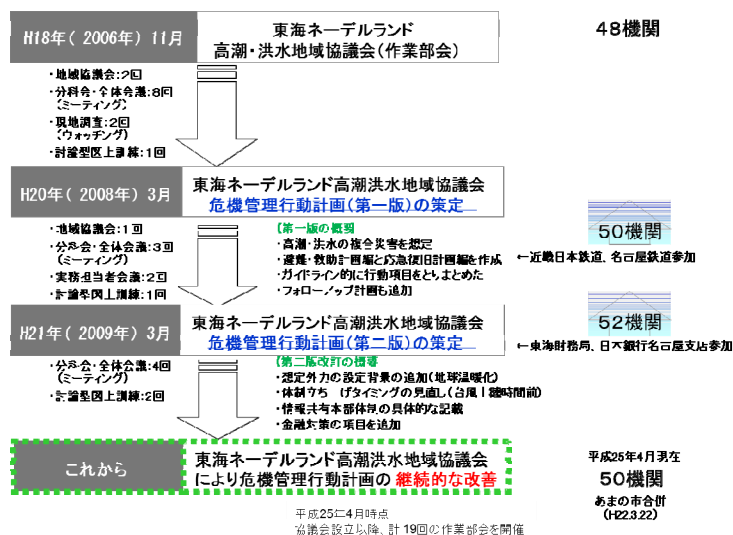


図1-1 危機管理行動計画の策定プロセス（これまでの経緯）

2013 年度（第 49 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 13-A-2

都市域における浸水解析

中部大学 教授

武田 誠

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2013 年 8 月

都市域における浸水解析

An Inundation Analysis in an Urban Area

武田 誠
Takeda Makoto

1. はじめに

近年、ダムや流域内の貯留施設により雨水を保持し、河川に隣接する遊水地で貯留し、堤防で洪水を制御する総合治水対策が実施されている。さらに、ハザードマップを積極的に作成・公開し、計画規模以上の洪水に対しては、避難による減災対策が採られている。ハザードマップ作成には浸水解析の知見が活用されており、治水対策の効果やその費用便益の評価にも浸水解析が活用されている。このように、都市域における浸水解析は、治水対策の検討のための不可欠なツールとなっている。

洪水氾濫解析の先駆けとして、河川流は運動量方程式と連続式を基礎として流れ方向に1次元的に解析し、氾濫流は浅水方程式（運動量方程式、連続式）を基礎として平面2次元的に解析する、岩佐・井上・水鳥の研究¹⁾がある。現在は、破堤流量、粗度係数なども含めた整理が行われており、土木学会水理公式集²⁾や治水対策の各種マニュアル³⁾にも反映され、広く普及している。また、2000年の東海豪雨を契機として内水氾濫対策の重要性が指摘された。内水氾濫は、下水道システムなどの排水能力以上の豪雨による浸水であるので、浸水解析に下水道システムの水理解析を含める必要がある。下水道流は河川流と同じく1次元解析モデルで表現可能であるが、状況に応じて満管流れと開水路流れが生じるため、解析が困難となる。この困難の解消法として、仮想的な壁を立てて満管流れを疑似的に開水路流れとして取り扱うスロットモデルを活用することが一般的であり、下水道解析も含めた浸水解析が実施された。

本報では、氾濫解析法の特徴、都市域の内水を対象とした浸水解析法を概説すると共に、結果の活用、解析法の高度化、更なる浸水解析の課題について論じる。なお、地下空間も含めた都市浸水の課題の検討を、戸田ら⁴⁾、川池ら^{5),6)}、関根ら^{7),8)}、秋山ら⁹⁾、石垣ら¹⁰⁾、渡辺ら¹¹⁾が精力的に進めており、研究対象も多方面に広がっている。ここでは、浸水解析技術に焦点を絞って論じる。

2. 氾濫解析法の特徴

2.1 計算モデル

まずは、地表面の浸水解析（以下、氾濫解析とする）に着目する。氾濫解析法は、前述したように、わが国の実務において広く普及しており、実績を得ている方法である。氾濫解析の基礎方程式は、以下に示す平面二次元の浅水方程式である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (3)$$

ここで、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速、 h は水深、 M, N はそれぞれ x, y 方向のフラックス ($M = uh, N = vh$)、 H は水位、 τ_{bx}, τ_{by} はそれぞれ x, y 方向の底面のせん断応力、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 ϵ_x, ϵ_y はそれぞれ x, y 方向の渦動粘性係数、 x, y は平面の座標、 t は時間である。

また、せん断応力はマンニングの粗度係数 n を用いて以下の式で表現される。

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 M \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (4) \quad \tau_{by} = \rho g n^2 N \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (5)$$

岩佐・井上・水鳥の方法¹⁾では、浅水方程式の未知量である流量フラックス、水深を、計算格子にスタガードに配置し、陽的差分法を用いて求めており、移動限界水深（運動量方程式を解く水深の判定値、通常 0.001m が用いられている）を定めて、

- 1) 運動量定義位置を挟む2つの格子の水深が移動限界水深以下の場合には氾濫水の運動方程式を解かない。
- 2) 水深が移動限界水深以下である格子から流出している流れがある場合にはその流れが無いものとしてゼロに置き換える。
- 3) 連続式の計算において、水深が負となる場合にはその水深をゼロに置き換える。

という三条件を付加することで氾濫解析が実施されている。ただし、急斜面の解析では、C.F.L.条件などの数値解析の安定条件を満足している場合であっても、計算が不安定となることがあり、そのために計算時間間隔を小さくする方法や、マンニング則または段落ちの式などを用いて運動方程式を解かない方法を取るなどの処理が必要となる。また、氾濫解析マニュアル³⁾には、低平地における適切なメッシュ分割として隣り合う格子の地盤高の差を 50cm 以下とするよう記されている。

本章では、氾濫解析法に着目して、急勾配箇所で見られる課題や質量保存に関する氾濫解析法の問題点および修正法について考える。

2.2 モデル領域における浸水過程の計算

図-1のモデル領域を対象とし、周りに壁を配置し、北方が高くなるように地盤高を変化させ、その勾配として 1/1000, 1/100, 1/20, 1/10, 1/2, 1/1 の6ケースを取り扱った。用いた格子幅 ΔS は 10m、計算時間間隔 Δt は 0.5s、底面の粗度係数 n は 0.067 である。計算開始から2時間まで全域に 50mm/h の降雨を与え、その後2時間までの計4時間の浸水過程を計算した。なお、平面二次元解析モデルを適用しているが、流れ場が一次元的であるため x 方向の運動方程式は解いていない。

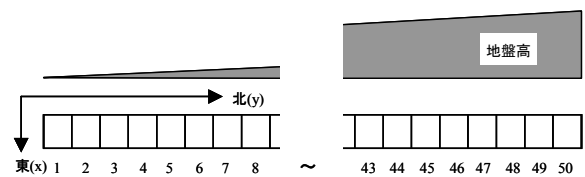


図-1 モデル領域

図-2に勾配 1/1000 と勾配 1/20 の場合の水位分布と浸水深分布を、図-3に計算終了時の氾濫水量を示す。図-2から、勾配 1/1000 の場合、水位と浸水深が滑らかな分布を示し、降水量の下流への輸送が計算されており、定性的な観点から妥当と判断される。一方、勾配 1/20 の場合、水位変動は十分に解析できてい

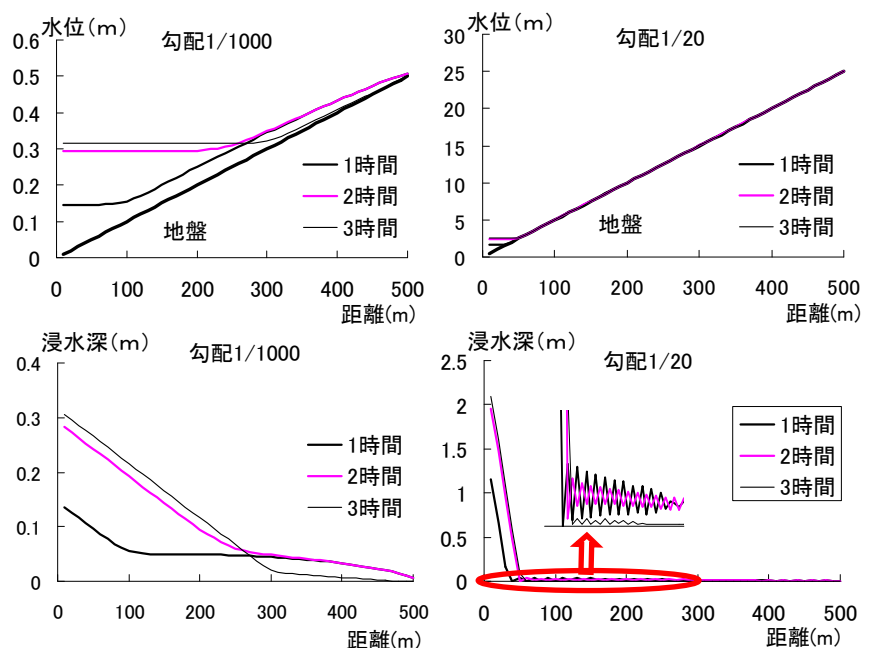


図-2 水位および浸水深

2013 年度（第 49 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 13-A-3

地下浸水とその備え

京都大学 教授

戸田 圭一

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2013 年 8 月

地下浸水とその備え

Underground Inundation and Its Measures

戸田 圭一
Keiichi TODA

1. はじめに

時間雨量が 100mm に迫る、あるいはそれを上回るような集中豪雨の発生により、都市域を中心に水害が頻発している。降雨という外力の大きさに加えて、都市を含む流域の都市化の進展により、河川の溢水による氾濫（外水氾濫）が発生したり、雨水を下水道や市内河川で処理できずに生じる内水氾濫が大規模化したりしている。

このような洪水氾濫が生じた場合、氾濫水は当然地盤の低いところへ流下する。もしも地下室、地下街、地下鉄駅といった地下空間が氾濫域に存在するならば、地下空間への流入をくい止める手だてがうたれないと、氾濫水は当然、そのような地下空間に浸入し、広がっていく。ビル地階の比較的小規模な地下室を除けば、地下駐車場、地下街、地下鉄駅などの公共の地下空間は多層でかつ互いが連絡している場合が多く、氾濫水の挙動は地上部のそれよりもはるかに予想しにくい。また地下鉄の軌道部を除くと地上に比べてそれらの空間の容積は一般に小さいため、浸水深の上昇が急激に起こり、市民に危険を及ぼす可能性も地上部よりもはるかに高いと推察される。したがって都市部の地下空間を有効利用するにあたっては、水害による地下空間の危険性をきちんと調べ、適切なハード・ソフトの対策を講じておく必要がある。

ここでは、著者が京都大学の都市水害研究グループの一員として参画してきた地下浸水に関する研究の成果を抜粋して示すとともに、地下浸水への備えについて、少しばかり考えてみることにする。

2. 都市水害時の地下浸水事例

2. 1 地下浸水の実例の概要

振り返るに、洪水氾濫による地下空間の被害は、1982年の長崎水害や1993年の鹿児島水害時に現れている。1982年7月に長崎市およびその周辺で発生した長崎水害は、梅雨前線豪雨の直撃を受けたものであり、市内近郊域での土砂災害が激しかったが、市内中心部でも急流小河川の出水により洪水氾濫が生じた。氾濫水はビルの地下室に流入し、電気系統などに被害を及ぼしている。また、1993年8月の鹿児島水害では、市中心部でも甲突川などの市内河川が各所で氾濫し、氾濫水は繁華街の地下飲食店やビルの地下室にも流入した。水とともに流入した泥のために被害が増大し、地上部以上に清掃や復旧に困難をきわめた。

その後、1999年6月の福岡市での御笠川の氾濫時に、大量の氾濫水がJR博多駅周辺の地下に流入し、またビルの地階で水死事故が発生したことから、都市水害時の地下浸水の問題が大きくクローズアップされた。2000年9月の東海水害でも地下浸水による被害が発生し、2001年7月には、韓国のソウル市でも日本と同様の地下浸水が発生した。最近でも、規模の大小はあるものの地下浸水が頻発しており、2011年9月には愛知県春日井市のJR中央線の高蔵寺駅で、2012年8月には大阪府守口市の大阪市営地下鉄大日駅で地下浸水の被害が発生した。

次に、多くの人達に衝撃を与えた1999年の福岡市、2001年の韓国ソウル市での水害時の地下空間の

浸水事例を少し詳しく見ていくことにする。

2. 2 1999年の福岡市の地下浸水

福岡市では、1999年6月29日午前中に時間雨量77mmを含む集中豪雨に見舞われた。図-1に、福岡管区気象台で観測された降雨分布を示す。福岡市内各地での内水氾濫の発生の後、市内を流れる御笠川が増大してその一部が溢水し、外水氾濫が発生する事態となった。御笠川の氾濫水は、地盤の低いJR博多駅周辺に流下していった。溢水箇所ならびに氾濫域を図-2に示す。

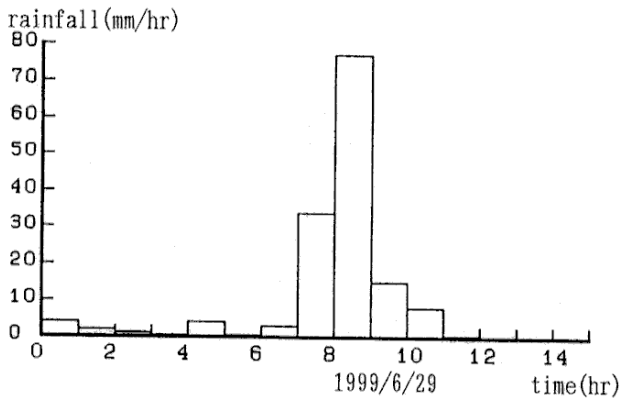


図-1 福岡の降雨分布

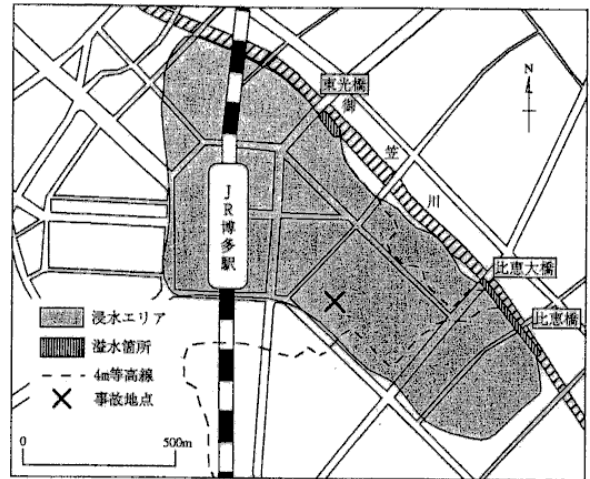


図-2 溢水箇所と氾濫域

JR博多駅東側の筑紫口には、駅の外に5箇所、駅構内に2箇所、福岡市営地下鉄「博多駅」に通じる地下鉄の入口がある。博多駅の筑紫口まで達した氾濫水は、これら地下鉄入口から、階段を落ちていく段落ち流れとなって改札口のフロア (B1F) に流れ込んだ。氾濫水は地下鉄ホームから地下鉄軌道にまで浸入し、レールが水をかぶったため、地下鉄は午後0時5分から午後3時45分まで博多駅～福岡空港間の運転を見合わせた。排水作業にあたっては、排水能力6m³/minのポンプを午後3時30分まで動かし続けた。また駅構内の天井部の破損やエスカレータのモーター部分の損傷といった被害も発生した。筑紫口では、地下鉄構内に隣接する地下1階の商店街にも、複数の階段、エスカレータから氾濫水が流入した。天井からの漏水も加わり、商店街の一部では浸水深が25cmにも達した。また筑紫口周辺のホテルでは、地下室への浸水の影響で電気設備 (空調設備、発電機など) や電話回線の故障が発生した。

さらに、御笠川の比恵橋～比恵大橋の溢水区間とJR博多駅のほぼ中間に位置する博多駅東2丁目のビルで、地下の飲食店にいた女性従業員が、流れ込んできた氾濫水により水死した。このビルの地階全体の床面積は約730m²、天井高は約3mである。飲食店のとなりは駐車場となっており、スロープのある駐車場入口と地表近くに位置する通気口から短時間のうちに氾濫水が流入し、地下空間がすぐに満杯となり避難できなくなった模様である。

2. 3 2001年の韓国ソウル市の地下浸水

2001年7月14日の深夜から15日早朝にかけて、韓国ソウル市は、発達した梅雨前線の影響で激しい集中豪雨に襲われた。ソウル市内の鐘路区気象観測所では、15日午前2時から午前3時までの時間雨量90mmを記録し、14日午後2時から24時間雨量が310mmに達した。降雨の分布を図-3に示す。この豪雨により、ソウル市内のいたるところで洪水氾濫が発生した。60,000世帯以上が浸水被害を受けたが、その多くは住宅密集地の地下あるいは半地下タイプの住宅に住む世帯と見られている。また地下鉄駅やバスターミナルの浸水のため、公共交通機関にも多くの混乱が生じた。地下鉄7号線江南高速バスターミナル駅付近 (図-4

2013 年度（第 49 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 13-A-4

豪雨災害による人的被害

静岡大学 准教授

牛山素行

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2013 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)。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、大雨に関係す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、2004～2011年の29事例、514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	現地調査
2004年		
平成16年7月新潟・福島豪雨	16	実施
平成16年7月福井豪雨	5	実施
平成16年台風第10号、台風第11号及び関連する大雨	3	
平成16年台風15号と前線に伴う大雨	10	実施
平成16年台風16号	13	
平成16年台風18号	19	
台風第21号と秋雨前線に伴う大雨	26	
平成16年台風第22号	9	
平成16年台風第23号	98	実施
平成16年11月11日～12日にかけての大雨	1	
2005年		
北陸地方等の大雨	1	
平成17年7月1日からの梅雨前線による大雨	5	
平成17年7月8日からの梅雨前線による大雨	6	
平成17年台風第14号と豪雨	29	実施
2006年		
平成18年の梅雨前線による大雨	32	実施
平成18年台風第13号と豪雨	9	
2007年		
平成19年7月5日からの梅雨前線及び台風	5	
台風第9号による大雨・暴風	3	
東北地方の大雨	4	実施
2008年		
平成20年7月28日からの大雨等	6	実施
平成20年8月5日の大雨	5	
平成20年8月末豪雨	2	実施
2009年		
平成21年7月中国・九州北部豪雨	34	実施
平成21年台風第9号	27	実施
2010年		
平成22年梅雨期(6月11日以降)における大雨	21	実施
2011年		
平成23年台風第6号	3	
平成23年7月新潟・福島豪雨	6	実施
平成23年台風第12号	97	実施
平成23年台風第15号	19	実施
合計	514	

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

2013 年度（第 49 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 13-A-5

水系一貫の土砂管理について

京都大学防災研究所 教授

角 哲也

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2013 年 8 月

水系一貫の土砂管理について

Sediment Management in a Sediment Routing System

角 哲也
Tetsuya SUMI

1. はじめに

水系に着目した 21 世紀の国土マネジメントの一つとして、流砂系 (Sediment routing system) の総合土砂管理 (Comprehensive sediment management) が重要となっている。森林や耕地などの生産源の状態変化と、砂防、ダムなどの治山・治水・利水を目的とする施設の整備による河川移動形態の変化により、土砂の移動・堆積量には大きなアンバランスが生じており、その結果、ダム貯水池の堆砂や濁水問題の発生、下流への土砂供給の減少による河床低下や海岸侵食、さらには河川・沿岸域の水域環境の変化が顕在化している。そこで、土砂移動による災害を防止する一方で、適正な土砂の流れによって、河川・沿岸域における、安全、豊かで潤いのある水域環境を保全・回復することが求められている。

こうした背景のもと、1998 年 7 月に河川審議会総合土砂管理小委員会から「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」の報告が出された。「流砂系」とは、図-1 に示すように土砂生産源を含む「河川域」と沿岸漂砂の流れが支配する「漂砂系」、さらにこれらを繋ぐ「河口」を包括した土砂の流れに着目したシステムの総称であり、土砂に関して生じている歪 (例えばダム堆砂や海岸侵食など) を関係者が連携を取りつつ総合的に解決していこうとする取り組みであった。

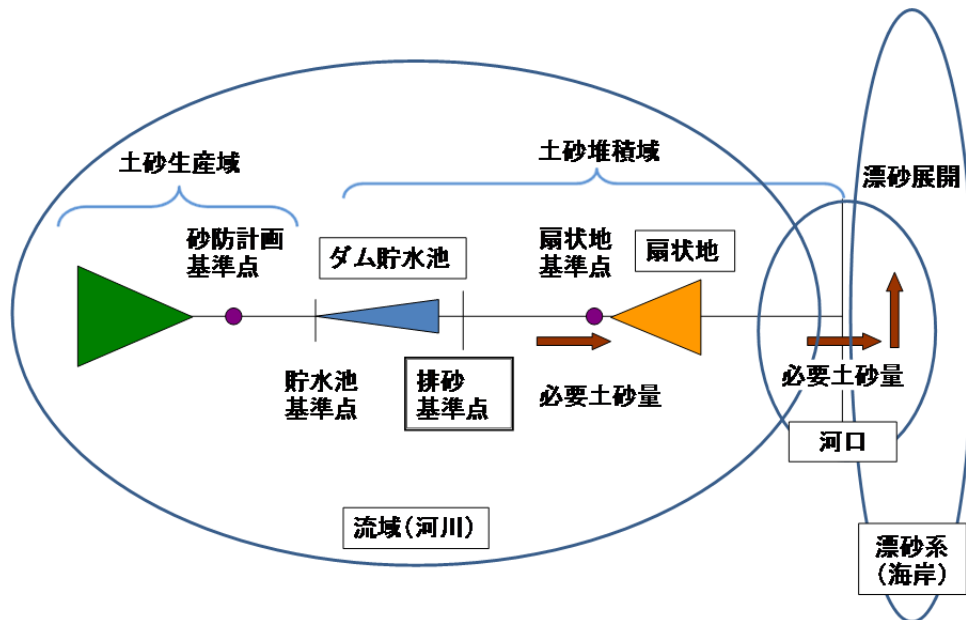


図-1 流砂系土砂管理のイメージ¹⁾

日本のマクロな土砂収支では、年間約 2 億 m³ の土砂生産のうち、約 1/4 (約 4,500 万 m³) がダム貯水池に堆積しているとされる。日本の約 34,000km の海岸線の約 60%が侵食海岸であり、それらの約 40% が河川からを含む土砂供給量の減少が原因とされる。1950- 60 年代には、河床からの砂利採取が急増し海岸侵食に大きく影響したが、現在は規制されている。流砂系の土砂管理のキーワードは「土砂移動の連続性の確保」であり、その中でもダムの堆砂対策の推進は大きな鍵を握っている。

土砂問題は、長期間の履歴に大きく依存するため、これまでの歴史的経緯を踏まえて、さらに将来の予測を行いつつ、現在採用可能な対処方策を着実に進める必要がある。一般にダム計画の堆砂容量は概ね100年間に溜まる推定堆砂量を基に決定される。しかし、排砂などの堆砂対策を実施しないダムでは土砂が流入・堆積して毎年確実に貯水容量が減少する。ダムは、他の社会基盤施設以上に造り替えには困難が伴う施設であり、今後はダムごとに適切な土砂管理を行って長寿命化を図り、また同時に流砂系における土砂移動の連続性を確保することが求められる。

ダム堆砂進行による影響は、今後50～100年スケールで効いてくることになり、地球温暖化に伴う影響と同等な時間スケールで同時進行することが予想され、むしろ、地球温暖化による影響のように不確実性を議論する余地のない、確実な現象と認識する必要がある。このような長期間にわたる課題は、「世代間の衡平(Intergenerational equity)」に関する問題と呼ばれ、地球環境問題がそうであるように、現役世代が将来世代に対して社会基盤施設を良好な財産として社会および自然環境に適合する形で引き継ぐ必要がある。

本稿では、このような流砂系の総合土砂管理について、貯水池土砂管理を中心に現状の課題および今後の展開について考えてみたい。

2. 流砂系土砂管理の現状と課題

(1) 貯水池堆砂の現状

日本の河川では、掃流砂・浮遊砂・ウォッシュロードの形態により土砂が輸送されており、河川を流下するこれらの土砂がダム貯水池に流入すると、図-2に示すように貯水池の持つ堆積特性に応じて粒径ごとに分級された堆砂デルタが形成される²⁾。

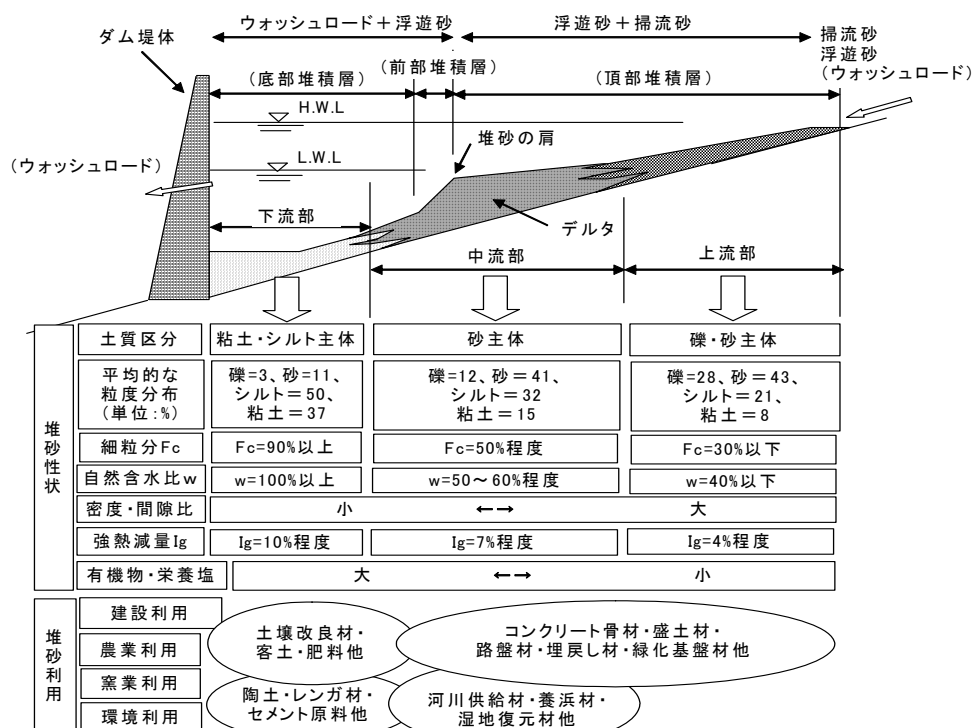


図-2 貯水池堆砂の性状と有効利用方策²⁾

貯水池内の堆砂領域は、①頂部堆積層、②前部堆積層および③底部堆積層に大別され、デルタを構成する①および②には河床を転動してきた掃流砂および浮遊砂のうち粒径の比較的粗い部分(0.1～0.2mm以上)が堆積している。このうち②はデルタの肩を通過した掃流砂がその直下に堆積し、それに浮遊砂

2013 年度（第 49 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 13-A-6

河川堤防の浸透破壊と液状化

中部大学 教授

杉井俊夫

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2013 年 8 月

河川堤防の浸透破壊と液状化

Seepage failure and Liquefaction of river levee

杉井 俊夫

Toshio SUGII

1. はじめに

国際会議や論文などでは、堤防のことを levee、bank または dike が共通語として使われるが、実際には dam (damm)、embankment など地域によって呼び名が異なる。堤防という言葉は、もともと山や川のように地理上の単なる土の高まりを指す地域ごとの土俗的な呼び名で、学術的な定義をしても共通語とはなりえない性格を持っていると中島¹⁾は述べている。また、海外の長期洪水と我が国の短期の洪水では堤防の役割も違うことがわかる。しかし、そうした堤防にあっても地盤材料に着目すると堤防破壊の原因は、①降雨、②越水、③浸透、④洗掘、⑤地震、⑥その他に分けられる。

本報告は、特に降雨や河川水による浸透に起因する「浸透破壊」と地震によって引き起こされる「液状化」について取り上げる。降雨・河川水による「浸透破壊」と地震による「液状化」は一見、外力が異なるために、全く異なる破壊現象と思われがちだが、共通するメカニズムがある。それは、どちらも土中の水圧（間隙水圧）の上昇による土粒子骨格部に働く応力（有効応力）の消失である。本報告では、破壊のメカニズム、現状の地盤情報、耐水・耐震性に対する安全性の照査、近年の災害事例を紹介し、新しい課題と研究動向について述べていく。

2. 堤体の中身はどうなっているのか？²⁾

堤防の浸透に関する照査を行う上で、大きな課題がある。その一つが「堤体断面構造の適切なモデル化」である。堤防は、幾度の築堤履歴を繰り返しながら現状に至っており、堤体構造が複雑で堤体断面のモデル化が困難なことが挙げられる。一般の盛土と異なり、図-2.1 に示すように均質または成層状になっていないことも珍しくない。しかし、一般には、過去の築堤・改修履歴のデータや開削による確認でなければ明らかにされない。

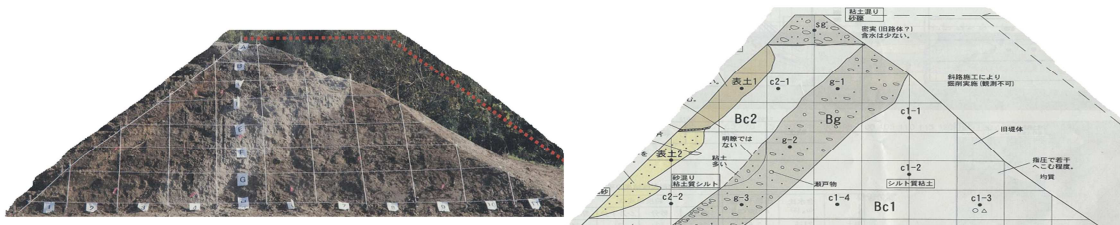


写真-2.1 堤防開削断面

ボーリングデータの補完や、堤体内の硬軟を調べるために、物理探査が行われる。「表面波探査」(図-2.1) や比抵抗を測定する「電気探査」(図-2.2) が用いられる。「表面波探査」では堤体をカケヤで起振し、水平に配置した複数のセンサーから堤体内の S 波速度の分布を求めることができる。S 波は硬い物体ほど速く伝播する性質を持っているので、その速さから地盤の硬軟を判定する。また、「電気探査」では地盤に電位差を発生させることにより、電気を通す導体の性質を利用して比抵抗値を測ることで水分量等の違いを判断する。これらの探査それぞれ

れ単独では、硬さや水分量だけで地質の判断を誤る可能性があるが、クロスプロットと呼ばれる両者を重ね合わせ（図-2.3）で地質を判断することで精度を上げた統合型物理探査が用いられるようになった。しかし、こうした物理探査は、CT スキャンみたく堤体を開削したかのように全てが分かるように受け取られがちだが、薄い層や亀裂などの検知は分解能から難しいことを理解して使用しなければならない。有効な方法として、人の造影検査のように水分変化などを与える、あるいは季節変動を比較することで変化しない情報を相殺する方法は情報の信頼性をより高くすることになる。

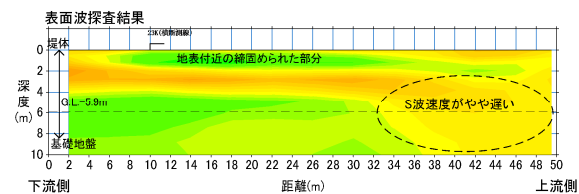


図-2.1 S波速度分布²⁾

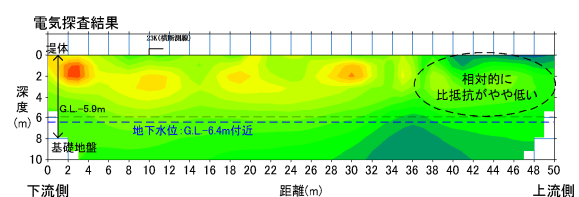


図-2.2 比抵抗分布²⁾

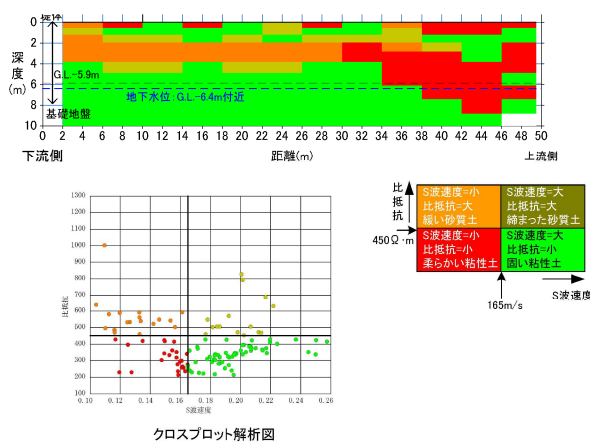


図-2.3 クロスプロット結果²⁾

最も信頼性の高いのは築堤・改修データである。しかし、古い築堤・改修工事における改変する断面構造は紙ベースで残っていても電子化されておらず、改修により健全な堤防になれば、時代とともにそのデータは深く埋もれてしまっている。これまでの築堤・改修履歴は、堤体のポートフォリオ (Portfolio) として整理し残していく必要があり、管理を含めた技術の伝承が希薄となっている現場で重要な課題となる。そうした堤体のポートフォリオは、安定性照査や変状が現れた場合の原因究明、適切な対策工の提案、物理探査技術の検証に役立つとともに、技術の発展につながる財産でもある。

一方、堤体基礎の地盤構成を把握するには、治水地形分類図 (図-2.4) は有効である。実際のボーリングデータと明らかに異なる点もあるが、概ね旧河道や後背湿地の位置がわかり、堤体基礎の地盤構成の把握につながる。河川は、過去に流れていた記憶「河川の記憶」を持っており、出水時に過去に流れていた旧河道へ向かって流れた事例もある。

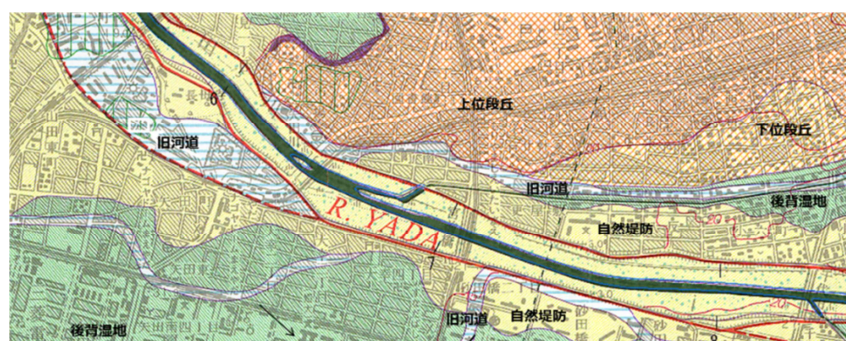


図-2.4 治水地形分類図²⁾

3. 土の透水特性

堤体の構成材料は主に土質である。降雨や河川水といった堤体へ浸潤する水分は土の透水特性により異なることや、透水特性を理解することでメカニズムを理解し易くなる。そこで、メカニズムの前に本章では、土の透水特性について簡単に説明しておく。

2013 年度（第 49 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 13-A-7

河道内樹林化機構とその制御

岡山大学 教授

前野詩朗

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2013 年 8 月

河道内樹林化機構とその制御

Forestation Mechanism in Rivers and its Control Methods

前野 詩朗
Shiro MAENO

1. はじめに

1980年代以降全国各地の河川で礫河原が減少し、それと相反するように樹林化が進行している。樹林化が進行すると河道の洪水疎通能力の低下、礫河原固有生態系の消失、水辺への近づきやすさといった親水機能を低下させるなど幾つかの負のインパクトが指摘されている。一般市民の目から見ると、河道内の樹林は緑が豊富であるため川の環境や景観に良いように思われがちであるが、実は洪水氾濫の危険性が増していることや礫河原固有種が絶滅に瀕するなど川本来の姿ではない状況となっていることが余り理解されていないのが現状であろう。

以上のような背景のもと、河道の樹林化に関する研究が1990年前後から活発に行われるようになり、また、鬱蒼と茂った樹林の伐採や砂州の切り下げによる礫河原再生事業が全国の河川で展開された。このような経緯を踏まえて、2012年11月に土木学会水工学委員会河川部会・環境水理部会共催のジョイントワークショップ「河川の樹林化とは何か：樹林化現象の統合理解と今後の河川流域管理に向けて」が神戸大学で開催された。宮本ら¹⁾は、土木学会論文集、水工学論文集、河川技術論文集から河川植生に関連する論文を詳細にレビューし、植生研究史を図-1に示すように萌芽期、醸成期、開花期、多様期に分類し、特に最近の20年間ほどで200編以上の多くの研究が実施されていることを紹介した。このワークショップの概要を河川の樹林化課題に対する現状と将来展望としてまとめ、多くの現場で行われている樹林化対応策について個々の現場での事象の水工学的解釈や、全国レベルでの情報の共有化が必要不可欠であることを指摘している。また、現状では研究課題が多様化しているため「河川の樹林化とは何か」という問いかけに対して直接的・短絡的な回答を得ること以上に、「樹林化現象を類型化する」ことが今後の研究・技術開発のあるべき方向性として重要であるとしている。

以上のように多くの研究者や実務者が河道の樹林化に関連する研究を進めてきているが、未だに検討課題は多い。本稿では、著者らが、岡山市内を流下する一級河川旭川を対象にして実施した樹林化機構の解明に関する研究や礫河原再生試験実施後の現地調査により得られた知見を述べる。

2. 旭川の概要

旭川は岡山県北部蒜山高原の北端に位置する朝鍋鷲ヶ山(1,081m)を源として、吉備高原を南流し、岡山平野を経て児島湾へ注ぐ幹川流路長約142km、流域面積約1,800km²の一級河川である。調査地区は

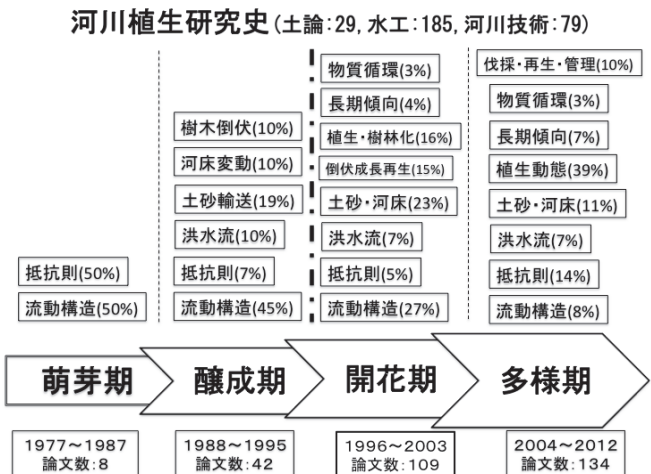


図-1 河川植生に関する研究の変遷¹⁾

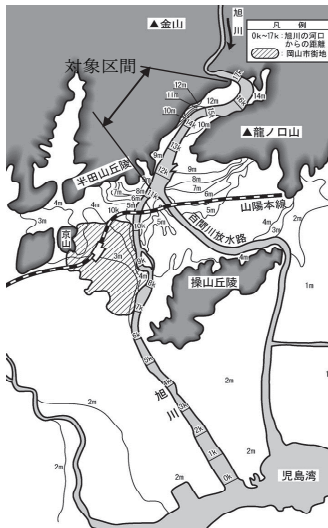


図-2 対象区間

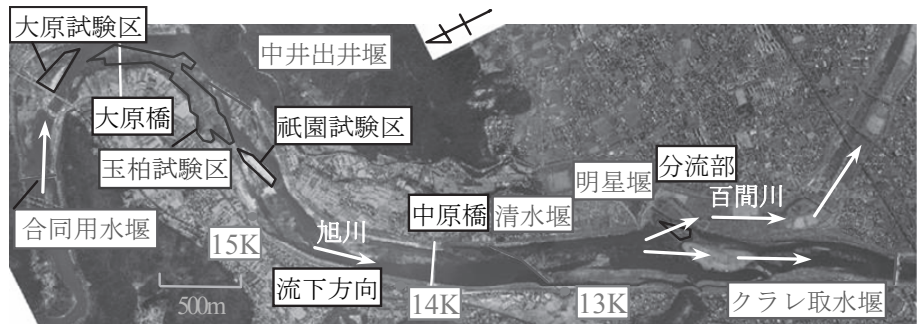


図-3 対象区間

表-1 旭川の主要洪水（基準地点：下牧）

順位	発生年	出水量 (m ³ /s)	原因
1	1934. 9.21	7,600	室戸台風
2	1945. 9.18	4,800	枕崎台風
3	1972. 7.12	4,610	梅雨前線
4	1998.10.18	4,310	台風 10 号
5	2011. 9. 3	3,140	台風 12 号

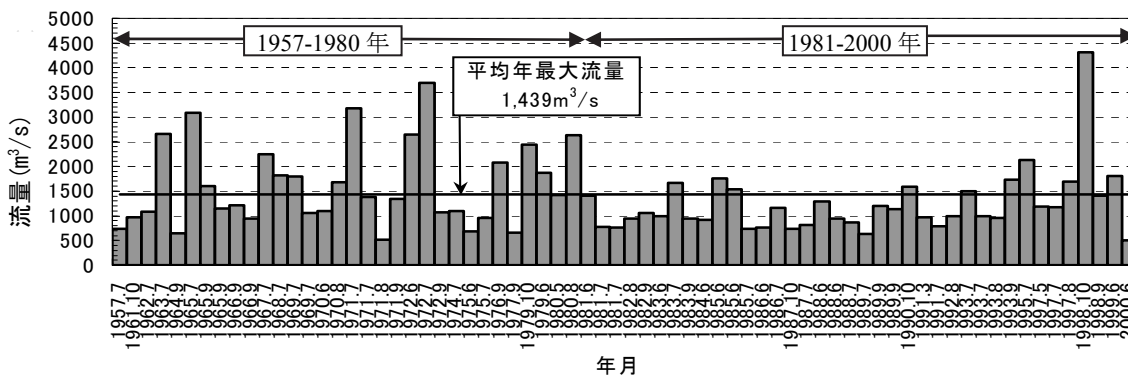


図-4 旭川の 1957 年～2000 年の 500m³/s 以上の洪水履歴（基準地点：下牧）

図-2 及び図-3 に示す河口から約 11 km から 17 km の区間で国土交通省管理区間である。表-1 は旭川の既往 5 位までの洪水である。大規模洪水は台風と梅雨前線によるものである。図-4 は、1957 年～2000 年の 500 m³/s 以上の洪水履歴を示している。1980 年までは、2,000 m³/s 以上の洪水の発生頻度は比較的高いが、1981 年から 2000 年までの期間においては、1998 年に発生した昭和以降、4 番目に大きな洪水 (4,310 m³/s) を除いて、2,000 m³/s 規模の洪水は殆ど発生していない。2008 年に策定された旭川水系河川整備基本方針では、室戸台風時の既往最大洪水を考慮して、基本高水は、そのピーク流量を基準地点下牧（河口から 19 km）において 8,000 m³/s とし、そのうち 2,000 m³/s を流域内の洪水調節施設により洪水調節し、同基準地点における計画高水流量 6,000 m³/s のうち 2,000 m³/s を百間川（旭川放水路）へ分流し、本川は 4,000 m³/s とすることが定められている。対象区間の平均河床勾配は 1/670 で川幅は約 300 m、河床材料の代表粒径は 40 mm～70 mm であり、河川の分類によるとセグメント 2-1 に相当する。対象区間の洪水流れや平常時の流況を支配する要素として、図-3 に示すように大きな蛇行と数多くの堰が存在している。なお、堰による湛水区間は約 3.3 km に及び、対象区間の約半分に対応する。

3. 樹林化の進行とその要因^{2), 3), 4)}

3.1 対象地区の樹林化の概要

旭川では、図-5 の 1980 頃とほぼ同じ構図で撮影された 2002 年の写真のように、河道の樹林化が急激に進行した。図-6 は約 50 年間の河道の変遷を示している。昭和 22 年には白っぽく見える礫河原が多く見られる

2013 年度（第 49 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 13-A-8

中小河川における多自然川づくりの考え方
—中小河川に関する河道計画の技術基準を中心として—

土木研究所
自然共生センター センター長

萱場祐一

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2013 年 8 月

中小河川における多自然川づくりの考え方

—中小河川に関する河道計画の技術基準を中心として—

An approach of nature-oriented river management

-focusing on technical standard of river planning for streams-

萱場 祐一

Yuhichi KAYABA

1. はじめに

日本の河川延長は一級、二級合わせて124,000kmに及ぶ。その内訳を見ると、一級河川の指定区間は54%、二級河川は25%、準用河川は14%半数となり、地方自治体が管理する中小河川の延長は直轄区間と比較して著しく長い。これは、日本における中小河川の管理のあり方、具体的な管理方法が国土スケールにおける陸水域の生物多様性を支配する重要な要因であることを示している。特に、多自然型川づくりが通達される以前に実施されてきた中小河川改修（以下、従来型中小河川改修）では、河道の直線化や河床掘削等により河川の平面形状、縦横断形状を全く別のものに作り替える場合が多く、結果として、生息場所の消失・劣化や分断化、そして、生物多様性の損失を引き起こしてきたと考えられる。例えば、「生物多様性総合評価」では、陸水域における多様性の損失は顕著であり、環境省レッドリストに絶滅危惧種として掲載された1,002種のうち、50%以上は生活の全てもしくは一部を淡水域に依存し、淡水魚類の36%は絶滅のおそれがあること、そして、この数値は他の分類群と比較して高い傾向にあることを報告している。また、この要因の例として、河岸の人工化、河道の直線化を含む河川改修、河床低下、河岸の人工化に伴うエコトーンの消失と横断方向の連続性の低下等従来型中小河川改修と関連が深い項目を挙げている（環境省生物多様性評価委員会 2010）。従来型中小河川改修の問題は生物多様性の損失だけに留まらない。河床を掘り下げて河積を確保する方法は、洪水時の流速・掃流力を増大させて、河岸侵食、護岸の被災リスク、河床の露岩化のリスクを増大させ、また、直線化に伴う自然地形の改変や護岸の設置、河畔林の伐採等は河川景観の悪化も引き起こしてきた。

従来型中小河川改修は、1991年（平成2年）からパイロット的に始まった「多自然型川づくり」（建設省1992）、そして、2006年（平成18年）から実施された「多自然川づくり」によって改善が図られてきた（国土交通省 2006）。その後、多自然型川づくりで多くの課題が指摘された中小河川については、具体的な川づくりの計画・設計方法を示した「中小河川に関する河道計画の技術基準」が示され、中小河川を巡る川づくりの思想や方法は大きく変わってきている（国土交通省 2008,2010）

本テキストでは、従来型中小河川改修の問題を整理した上で、「中小河川に関する河道計画の技術基準」（以下、技術基準）およびこの解説書となるポイントブックⅢ（以下、PBⅢ）（多自然川づくり研究会 2011）の内容を紹介し、技術基準とPBⅢ（以下、技術基準類）で示された方法が従来型河川改修の課題をどのように解決しようとしているかを解説する。特に、川幅の設定、河道内断面形状の設定、河岸・護岸・水際部の計画・設計については紙面を割いて詳細を説明する。

2. 中小河川改修の課題

2. 1 従来型中小河川改修の課題

従来型の河川改修方法を具体的に示す資料は乏しいが、多自然型川づくりを実施する以前においては、河道の直線化による疎通能力の向上、河床の掘削を中心とした河積確保、護岸の設置による河岸侵食の防止は

ごく一般的に行われていた改修方法であった。これは、後述する多自然川づくりの基本指針において、「過度のショートカットを避けること」、「川幅をできるだけ広く確保すること」、「護岸については、必要最低限の設置区間とし、生物の生息・生育・繁殖環境と多様な河川景観の保全・創出に配慮した適切な工法とすること」が留意事項として示されていることから推測できる。ここでは、これらの人為的インパクトが河川環境、河道の安定に及ぼす影響を概念的に整理する（図-1）。図中には、従来型中小河川改修の具体的方法を起点にレスポンスの経路を整理し、最終的に生じる河川環境に対する影響を、緑を背景とした赤文字で、河道に対する影響を、青を背景とした赤文字で示している。また、後述する技術基準が、この経路をどのように断ち切ろうとしているかを青文字で示している。

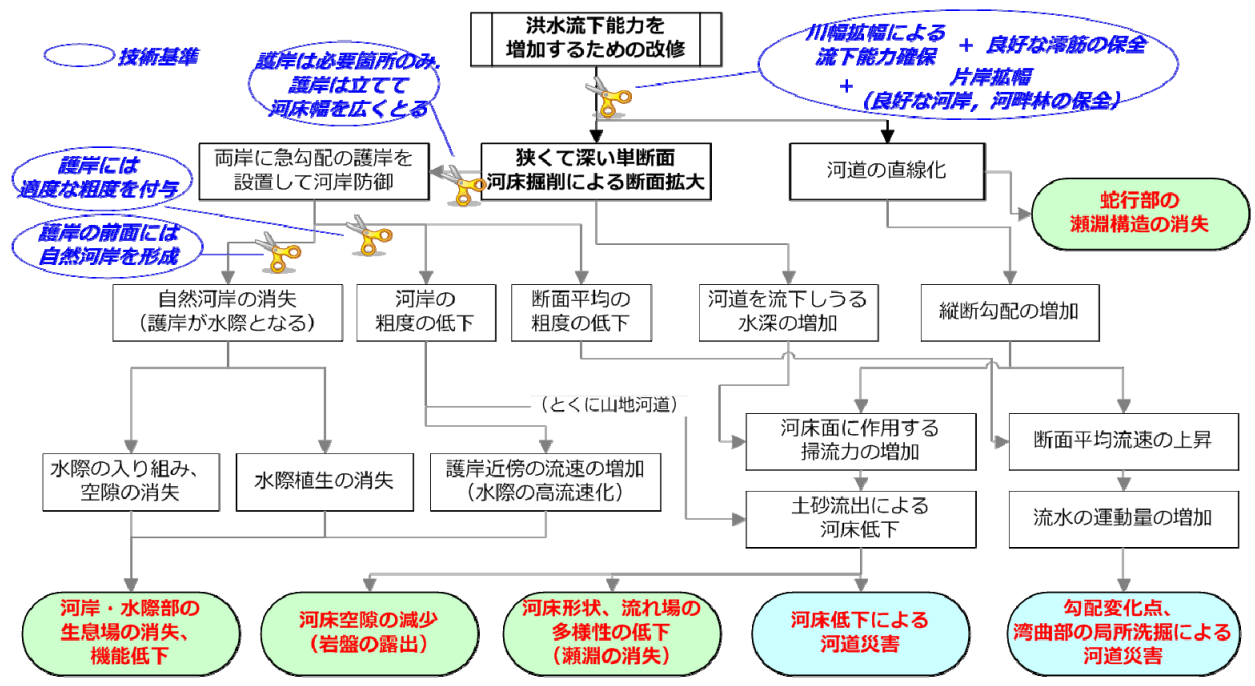


図-1 中小河川に対する人為的インパクトに伴う応答とその経路

河道の直線化、掘削による川幅水深比の減少は河道内の瀬・淵構造の単調化を引き起こす主要なインパクトであり、瀬・淵構造の消失は魚類をはじめとした水生生物に影響を及ぼすことが示されている（島谷・萱場・小栗 1994, 多自然川づくり研究会 2011）。具体的には流速・水深・底質の分布域の縮小が生じ、生息場タイプを減少する。特に、低流速・高水深域の消失は、生息できる魚種数を減らし、かつ、生息できる個体の最大サイズを小さくするだろう（森下 1997）。直線化に伴う縦断勾配の増加、掘削による水深の増加、護岸設置に伴う粗度の減少は河床面に働く掃流力の増加、流水の運動量の増加を招き、勾配変化点や湾曲部外岸側での局所洗掘深の増大、河床低下に伴う護岸の被災に繋がる。また、河床形状の単調化や岩盤の露出（露岩化）を引き起こし、河床に依存する底生動物や底生魚に影響を及ぼす（石山ほか 2009）。加えて、河床の露岩化は河床近傍に形成される低流速域を縮小させ、遊泳魚にも影響を及ぼすことが近年の研究から明らかになりつつある（未発表）。河床掘削に伴う川幅水深比の減少は砂州の形成を抑制し、水際部の単調化、瀬・淵構造の消失に繋がる恐れがある。また、河岸の急勾配化は河岸の安定のための護岸の設置を必要とするため、護岸法面上が水際となり、水際部の植物帯や凹部に形成される淀みが消失し、魚類等の水生生物の生息が困難になる（Kawaguchi et al 2008）。なお、図中には示していないが、自然河岸の消失や護岸の急勾配で露出した露出の高さの増加は河川景観の悪化を引き起こす要因である点にも留意する必要がある。

このように、従来型中小河川改修の実施が河道の安定、自然環境に及ぼす影響のプロセスは概念的に整理されつつある。また、これらの具体的な影響についても個別の場所を対象とした事例報告や研究成果が見ら