

2014 年度（第 50 回）  
水工学に関する夏期研修会講義集

A コース

Lecture Notes of the  
50th Summer Seminar on Hydraulic Engineering, 2014  
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  
2014 年 8 月  
August 2014

2014 年度（第 50 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：近年の大規模水・土砂災害と予測・対策技術の  
高度化

A-1 近年の大規模水・土砂災害の特徴

九州大学 特命教授 名誉教授 小松利光  
Toshimitsu KOMATSU

A-2 大都市域における浸水危険性の評価手法とそれに基づく避難誘導

早稲田大学 教授 関根正人  
Masato SEKINE

A-3 九州における大規模災害とその対応

九州地方整備局 河川部長 古賀俊行  
Toshiyuki KOGA

A-4 河川堤防の決壊と対策技術

京都大学 教授 中川 一  
Hajime NAKAGAWA

A-5 フリーソフトiRICを用いた河川の流れ，河床変動，河岸浸食予測の実践

北海道大学 教授 清水康行  
Yasuyuki SHIMIZU  
北海道大学 学術研究員 久加朋子  
Tomoko KYUKA

A-6 減災型治水に求められる河川技術の展望と課題

九州工業大学 教授 秋山壽一郎  
Juichiro AKIYAMA

A-7 大規模洪水に適応可能な河道設計と河道管理

中央大学 教授 福岡捷二  
Shoji FUKUOKA

A-8 集中豪雨のリアルタイム観測・予測技術

京都大学 教授 中北英一  
Eiichi NAKAKITA

2014年度（第50回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 14-A-1

# 近年の大規模水・土砂災害の特徴

九州大学 特命教授 名誉教授

小松利光

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014年8月

# 近年の大規模水・土砂災害の特徴

## Characteristics of Recent Large-scale Water-related Disasters

小松利光

Toshimitsu KOMATSU

### 1. はじめに

平成24年7月に九州北部を襲った集中豪雨は大きな被害をもたらし、我が国の防災基盤が未だ脆弱であることを如実に示した<sup>1)</sup>。今回の災害に限らず、近年の豪雨災害で被災した住民が異口同音に口にするのは、「こんな雨は初めてだった」、「水位上昇が急でアツと言う間だった」であり、これまでの常識や経験が全く役に立たないような大きな災害に近年しばしば見舞われるようになってきている。

一方、我が国のインフラの大部分は高度成長期に建設・整備されており、老朽化の危機に瀕している。しかしながら世論の公共事業に対する視線は依然として厳しく、傷んだインフラの補修すらままならないのが実状である。ただ、政治も現状に対し、ある程度の理解を示すようになり、「国土強靱化政策」や「防災・減災ニューディール政策」等に添った政策がある程度実施されるようになってきた。しかしながら我が国の経済状況を考えると長年に渡る多額の投資は許されない。いずれにしても、今日の我々はもう既に待ったなしの状態にまで追い込まれており、自然環境と共生しながらあまりコストと時間をかけずに効率的に防災力を上げていくことが喫緊の課題となっている。

### 2. 地球温暖化による災害外力の増大

近年地球温暖化によると思われる豪雨、干ばつ、台風の強大化などの災害外力（災害を引き起こす力）の増大が実感されるようになってきた<sup>2)</sup>。今後も温暖化による様々な影響が顕著に現れてくるものと考えられる。また近年、社会の自然環境へのニーズも高まっており、増大する災害外力と社会の望む自然環境の保全に我々は今後同時に対応していかなければならない。

災害外力と防災力の関係を図-1に示す。かつては防災基盤が貧弱であったため、災害外力と防災力の間に大きなギャップがあり、人々は自然災害に襲われてもほとんど抵抗する手段を持たず叩かれっ放しであったが、少なくとも何がどうなるかという災害の実相は経験により理解できていた。その後人々は営々とインフ

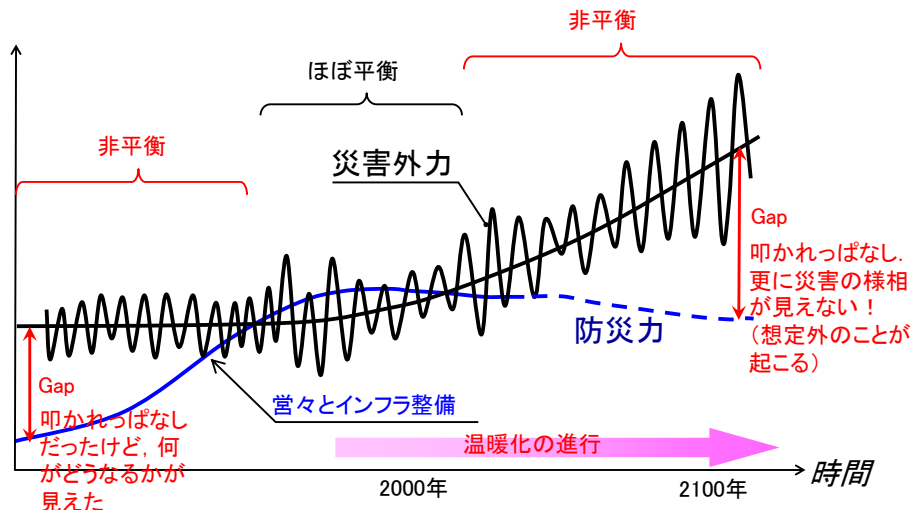


図-1 災害外力と防災力の関係

ラの整備に努め、現在に至って何とか災害外力と防災力が拮抗するところまでもってこることができた（勿論、大きな災害外力が働いたときは被害も発生するが）。しかしながら今後は、温暖化による急激な災害外力の増大により、また防災基盤の老朽化等による防災力の低下により、再び両者の間に大きなギャップが生じ、大きな災害外力がどこを襲っても必ずそこで甚大な被害（すなわち自然災害）が発生するという状況が起こってくる。これを防ぐために災害外力の増大を抑制しようとするのが緩和策であり、防災力を上げようとするのが適応策であるが、これらの策をもってしても災害外力と防災力の間のギャップを埋めるのは極めて困難な状況となっている。また、災害外力の増大下ではこれまでの経験が役に立たず、何が起こるか分からないため、想定外の大規模災害に発展する可能性が高い<sup>3)</sup>。災害外力の上昇は今我々が想像している以上に実は大変なことなのである。我々は気候変動に対し、叡智を結集して有効な適応策・減災策を講じていかなければならない。

### 3. 水・土砂災害の形態の変化

地球温暖化の影響は多方面に現れてくるが、ここでは水・土砂災害に限定して議論する。近年の日本の豪雨災害では時間雨量 100mm 以上の降雨も珍しくない。これまでになかったような大量の雨が降ると、洪水災害が引き起こされ、それに対する新たな対策が必要となるが、洪水災害だけでなく新たな土砂災害も引き起こされることとなる（図-2）。これは、従来の降雨には持ちこたえられた斜面も今までになかったような強い降雨には耐えられなくなるからである<sup>3),4)</sup>。また従来は、表層崩壊が多く、土砂災害発生箇所の下部が限定的に被災していた。しかしながら強くかつ大量の降雨は深層崩壊を引き起こし（図-3）、大量の土砂を生産する。この土砂は発生箇所直下に大規模災害をもたらす（ex.台湾高雄県小林村で一村が全滅するという大惨事<sup>5)</sup>）だけでなく、天然ダムを構築することが多い。天然ダム上流側では洪水流が貯留して水位が上昇し、越水と共に天然ダムの崩壊が起こり、下流を段波が襲うことになる<sup>4)</sup>。また河道に流れ込んだ土砂は全てが海まで流送される訳ではなく、河道に残って河床の大幅な上昇を引き起こす。天然ダムの崩壊と河床の上昇は、かつては局所的だった被害の時空間的な拡がりを生じさせ、従来の河川計画を無用なものとしてしまう。また土砂災害に伴って起こる多量の流木の生産は、新たな流木災害を引き起こす。このような将来の水・土砂災害に対し、根本的な対策が新たに求められている。

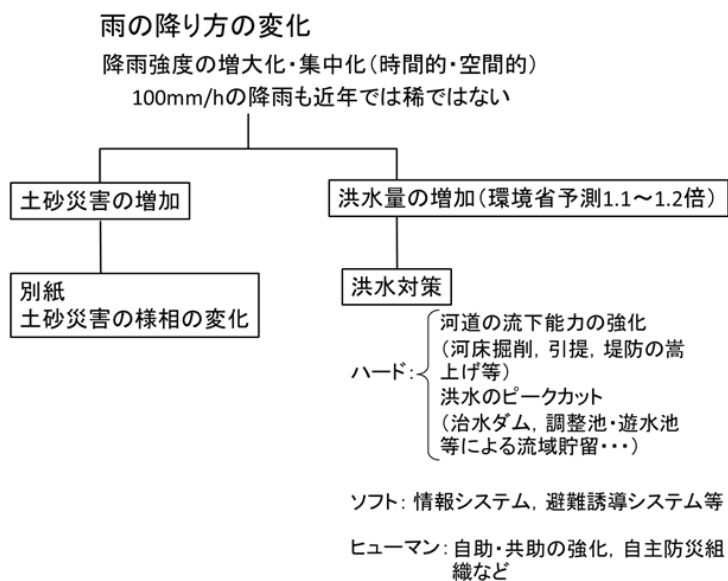


図-2 降雨の変化と災害対策

2014 年度（第 50 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 14-A-2

大都市域における浸水危険性の評価手法と  
それに基づく避難誘導

早稲田大学 教授

関根正人

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014 年 8 月

# 大都市域における浸水危険性の評価手法とそれに基づく避難誘導

## Numerical Prediction of Inundation in Highly-urbanized Area and Evacuation Movement Simulation from Underground Space

関根 正人

Masato SEKINE

### 1. はじめに

地球規模での気候の極端化が指摘されてきている昨今、我が国でも各地でこれまでにない規模の豪雨に襲われるようになった。たとえば、2011年の九州北部豪雨、2012年の紀伊半島豪雨、2013年の伊豆大島豪雨、同年の京都ならびに名古屋の豪雨などは記憶に新しいところであろう。これらのうち名古屋と京都の事例を除けば、いずれも都市化の進んでいない地域で発生したものであり、豪雨に伴う斜面崩壊や中小河川の決壊などにより甚大な被害にまで到った。これは土砂災害と呼ぶべきものであり、本稿で対象とする「高度に都市化された区域」で発生する「都市浸水」とは発生のメカニズムが明らかに異なる。

東京をはじめとする大都市では、近年、高強度の局地的集中豪雨に繰り返し見舞われるようになった。以下、東京を例に説明すると、都市域は下水道ネットワークと都市河川からなる「雨水排除システム」により豪雨から守られている。そのため、設計強度を下回る強さの雨であれば浸水が発生することはない。しかし、河川が大氾濫を起こすほどの豪雨でなくても、下水道の設計値を超える高強度の雨が降ると、地上に水が取り残され「都市浸水」が発生する。東京で発生する浸水被害の大半はこの「内水氾濫」である。最近では、継続時間は1時間程度と短いものの、その強度が70~90mm/hを越えるような豪雨が頻発している。今後、その強度が増大するかあるいは継続時間が大きくなると、発生する浸水はこれまでになく深刻なものとなるおそれがある。その一方で、高度に都市化された東京都心部などでは、都市生活者の利便性や経済効果などを考慮して大規模な地下空間が開発されている。地下鉄も都市域全体を網羅するように縦横に延びている。都市浸水時に最も避けなければいけない最悪のシナリオは、地上の氾濫水が連絡階段を通じて地下空間にまで到り、「地下浸水」が引き起こされることである。2000年以降に限っても東京・名古屋・大阪・福岡などの大都市で地下浸水が発生しており、昨年名古屋の事例は記憶に新しいところである。

一方、今後、巨大台風が首都圏を襲い、上流域で降った豪雨の影響でたとえば荒川の水が河川堤防を越えて堤内地側に流れ込むことになるとすると、都市域全体が水没するほどの大規模な浸水にまで発展することがあり得る<sup>1)</sup>。東京が抱えるもうひとつの浸水被害としてこのような「外水氾濫」があり得る。これは、局地的集中豪雨に比べて発生頻度が低いものの発生した場合の被害は甚大であり、国家的な危機にまで到る可能性がある。このような危機は起こらないものと楽観したり、目を背けたりするのではなく、実際に起こるとすればどの程度の規模になり、氾濫水はどのような経路をたどって拡大するのか、といったことを科学的に明らかにしておくことこそ重要である。

これまでにない豪雨から都市を守り、浸水被害の軽減を実現していくためには、都市で発生する浸水を可能な限り精緻に予測する手法あるいは技術が必要であり、これが実務に有効に活用されていくことが重要である。このような点に鑑み、著者は、東京で発生する浸水・氾濫をできるだけ現実に即して精緻に数値予測する手法の開発を進めるとともに、東京23区内の浸水危険性を明らかにするための研究を積み重ねてきている<sup>2,3)</sup>。その手法については次章で説明するが、実在する道路・下水道などのインフラに関しては一切省略することなく考慮し、しかも可能な限り水理学上の基礎原理のみに依拠した厳密な予測計算手法となるように心がけた。ここでは、不確かな仮定や近似を持ち込むことはなく、数字あわせのために補正係数を導入した

りすることも一切してない。そのため、高精度でかつ信頼性も高い浸水・氾濫予測手法ができあがったと考えている。

本稿では、東京都心部で発生が懸念されている二つの浸水イベント、すなわち、(i) 短時間・高強度の集中豪雨によって地下浸水にまで到る内水氾濫と、(ii) 大河川からの越水が生じた際の大規模な外水氾濫、が生じた場合について、詳細な数値予測を行った結果について説明する。また、これを踏まえて、東京都心部の浸水危険性について論じるとともに、被害軽減に向けてとるべき対策についてもふれることとする。

## 2. 高度に都市化された区域の浸水・氾濫の数値予測手法

東京23区では、これまで時間雨量50mmの豪雨を設計強度として下水道ならびに都市河川の整備が行われてきた。下水道と都市河川により構成される「雨水排除システム」は、(i) 雨水ます経由で下水道に運び込むことにより、都市に降った雨水を地表面から排除する、(ii) 下水道内の水を地上に逆流させることなく神田川などの都市河川まで運ぶ、(iii) 都市河川の水を再び都市域に溢れ出すことなく東京湾まで運ぶ、という3つのプロセスにより完結する。もしいずれの一つでも機能しない事態となれば「都市浸水」が引き起こされることになる。

実在するこのような雨水排除システムをできる限り忠実に再現しつつ、「都市浸水」を数値予測する手法として、著者により開発されてきた「街路ネットワーク浸水・氾濫解析手法」<sup>2),3)</sup>がある。本章では、図-1を参照しながらこの手法の概要を簡潔に述べる。

東京23区内には、かなり高密度の道路ネットワークができあがっており、地表面積に占める道路の面積比率は30%を超える。この区域内で発生する氾濫水の流れについて考えるとき、「道路」とこれにより囲まれた「街区」とに分けて取り扱うのが最も理に適っていると言える。このうち街区は高層ビル群が林立する区域か住宅密集区域になっている。例外となるのは、皇居や日比谷公園などに代表されるオープンスペースや、わずかに見られる学校の校庭くらいである。さらに、東京都心部の土地利用状況を建ぺい率の値を基に判断すると、街区の60%~80%が建物により占められており、街区を横切るような流れが生じるスペースはほとんどなく、わずかに建物群の谷間に残されているにすぎない。このため、東京23区で浸水・氾濫が発生した場合には、水の流れは道路ネットワーク上で起こると考えるべきである。このような理由から、高度に都市化された区域における浸水の数値予測は、他の研究者<sup>4)・7)</sup>による平面二次元解析ではなく、ここで説明する「街路ネットワーク浸水・氾濫解析手法」により行う方がはるかに合理的であり、高精度にもかかわらず高速の予測が可能である。なお、本手法の妥当性に関しては可能な限りの検証が完了している。具体的には、2005年に妙正寺川流域で発生した浸水・氾濫の事例と、2008年に雑司ヶ谷幹線下水道で発生した水難事故時の下水道への雨水集中の事例を検討対象として再現計算を行い、その結果を観測データと直接比較している。その結果として、本手法により二つの事例がかなり正確に再現されることが確認された。

この手法による主な計算は、(a) 道路上の氾濫水の流れ、(b) 下水道内の流れ、(c) 河川の流れ、(d) 街区に降った雨の流れに関するものであり、これに必要な応じて (e) 地下空間内の浸水の計算が加わる。この計算では、連続式と運動方程式のみに依拠した厳密なものとなるように努め、下水道内の流れの解析に導入したスロットモデルを除けば、近似やモデルと言えるものは導入していない。この計算に当たっては、図-1の概念図に矢印で示されている水の流れ、すなわち、雨水ますを介した「道路面と下水道」との間の水の流出入や、雨水吐を介した「下水道と河川」との間でのもの、さらには「道路と街区」ならびに「道路と河川」との間の水の出入り、を的確に評価する必要がある。これらについても可能な限り厳密かつ正確な評価ができるようになっている。このように実在するインフラの詳しいデータや土地利用に関する情報をすべて入力し、これを忠実に反映させた予測計算を行うことにより、都市が浸水していくプロセスが精密に解き明かされることになる。この解析には、実在するすべての道路ならびに交差点についてのデータや、枝管路に到るすべての下水管ならびにマンホール点の情報が予めデータベースとしてまとめられ、これが考慮されている。



2014年度（第50回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 14-A-3

# 九州における大規模災害とその対応

九州地方整備局 河川部長

古賀俊行

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014年8月

# 九州における大規模災害とその対応

## Great Flood and Emergency measures in Kyushu region

古賀 俊行

Toshiyuki Koga

国土交通省九州地方整備局河川部長

### 1. はじめに

九州地方は、地理的に台風の接近、上陸が多いことなどから、たびたび記録的な豪雨に見舞われ、過去より大きな被害が発生している。古くは、約 60 年前の昭和 28 年 6 月の西日本大水害、近年に限っても平成 17 年 9 月の台風第 14 号に伴う豪雨、続く平成 18 年 7 月の鹿児島県北部豪雨等で甚大な災害が発生している。このような災害を踏まえて、九州地方整備局では、着実に治水事業を進めてきたところであるが、平成 24 年 7 月初旬から中旬に九州地方は改めて記録的な豪雨に見舞われた。

本稿では、この豪雨で甚大な被害を生じた筑後川水系花月川、山国川、白川水系、矢部川の出水概要、被災状況等を紹介した上で、九州管内で 22 年ぶりに発生した直轄河川堤防の大規模な決壊事案である矢部川の堤防決壊について、原因究明の過程等について紹介することとしたい。

### 2. 平成 24 年 7 月豪雨の概要、復旧について

#### (1) 概況

平成 24 年 7 月 3 日から 4 日にかけて梅雨前線が九州北部地方に停滞し、前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込み、福岡県及び大分県に大雨をもたらした。さらに、7 月 11 日から 14 日にかけて、東シナ海上の大気下層に蓄積された大量の水蒸気が、強い南西風によって持続的に九州に流れ込み、複数の線状降水帯を形成し長時間停滞することで、九州北部の福岡県、大分県及び熊本県を中心に大雨をもたらした。これらの降雨により、7 月初旬から中旬にかけての約半月間で、筑後川、山国川、矢部川、菊池川、白川の流域において、累加 1,000mm を超える雨量が記録され（図-1）、筑後川、白川、矢部川、山国川、菊池川、遠賀川、六角川等の九州北部の各水系において、はん濫危険水位を超過し河川の氾濫等が発生した（図-2）。

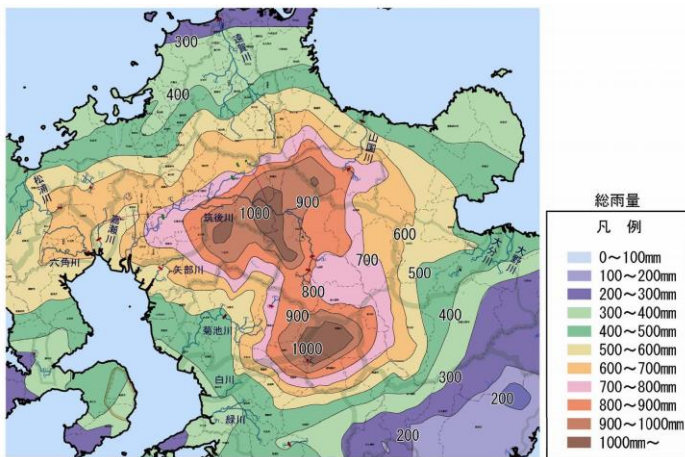


図-1 等雨量線図 (平成 24 年 7 月 1 日～16 日)



図-2 九州北部における河川の出水状況

(2) 花月川 (7月3日、14日)

① 出水概要

筑後川支川花月川では、7月3日の降雨において短時間に記録的な豪雨を観測し、花月川水位観測所(大分県日田市)では1時間に約3.5mの急激な水位上昇を記録し、はん濫危険水位を超え昭和47年7月出水時の水位である3.68mを約40年ぶりに更新する観測史上最高の4.16mの水位を記録した。さらに7月14日の降雨で、7月3日に記録したばかり観測史上最高水位を10日余りで再び更新する4.37mの水位を記録した(図-3)。

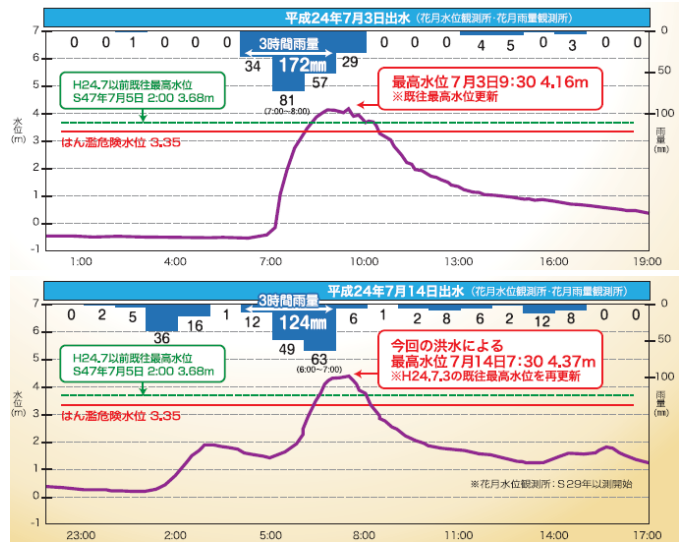


図-3 花月川の雨量と水位(7月3日、14日)

② 被災概要

7月3日の出水では、花月川左岸5k800付近で160m、右岸6k200付近でも200mにわたり堤防が決壊し、さらに13箇所から洪水流が越水したことにより、日田市街地を含む花月川沿川で浸水面積121.3ha、全壊1戸、床上浸水414戸、床下浸水306戸の被害が発生した。さらに、7月14日の出水でも再び洪水流が越水し、浸水面積78.8ha、床上浸水101戸、床下浸水181戸の被害が発生した。堤防等の被災は、7月3日に発生した2箇所の堤防決壊を含め、7月3日、14日の両日であわせて18箇所の護岸崩壊等が発生した(写真-1~3)。

堤防決壊箇所付近は、平均河床勾配が1/90でセグメント1の区間である。準二次元不等流計算による検証(再現計算)によると、今回の洪水では $6\text{m}^3/\text{s}$ 以上もの高流速が局所的に発生しており、河床、河岸等に非常に大きな外力が作用したと推察される。さらに、急流河川特有の河床洗掘や河岸浸食等に伴う河床変動が発生し、湾曲部内岸側への洲の発達やそれに伴う洪水流の編流も生じている。



写真-1 花月川8k000付近堤防決壊状況(7月3日)

堤防が決壊した左岸5k800付近や右岸6k200付近の痕跡水位は、ほぼHWLであり越水は生じていない。しかし、先に述べたような非常に大きな外力と河川特性から、洪水中に内岸側に洲が形成され、一方で外岸側の堤防基礎部の浸食が進行し、堤防の決壊に至ったものと推察される(写真-2、3)。



写真-2 花月川5k800付近堤防決壊状況(7月3日)



写真-3 花月川6k200付近堤防決壊状況(7月3日)

2014 年度（第 50 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 14-A-4

# 河川堤防の決壊と対策技術

京都大学 教授

中川 一

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014 年 8 月

# 河川堤防の決壊と対策技術

## River Embankment Breach and Its Countermeasure Technologies

中 川 一

Hajime NAKAGAWA

### 1. はじめに

我が国の国土面積 37.8km<sup>2</sup> の 10%にあたる低平地に、人口の 50%が住み、財産の 75%がここに集中していると言われている。東京、大阪、名古屋の大都市はこのような低平地に立地しており、社会経済活動の中核である。この低平地は主として「河川堤防」により洪水から守られている。この「河川堤防」は長大な構造物であるため、経済性、材料調達の容易さ、復旧のし易さ、耐久性等の観点から、「土」でつくることを原則としている。世界各国でも同様に、私たちの命と財産は、この「土」のできた堤防、いわゆる土堤で守られている。この土堤が決壊すると大規模な洪水氾濫が生じて都市の機能はマヒし、被害が世界各国に波及することは容易に想像できる。

堤防から川の水があふれない場合には、堤防の世界に水工学の出る幕は少ない（河川流による堤体の侵食や洗掘等は水工学の研究分野）。パイピングやすべりに対する安全性の検討が主であり土質工学や地盤工学の分野にお任せの世界である。しかし、一旦「想定外の洪水」（超過洪水）が生じると、堤防から河川水が溢れて流れ出す。「土砂」でできている堤防や基礎地盤は、越水する流れで侵食されたり洗掘されたりして、破堤に至ることがある。そうなる水工学にも出番がある。

IPCCの報告にあるように、気候変動による外力の増大化、強大化が指摘されている中で、昨今、破堤氾濫による災害が少なからず発生している。越水によるもの、浸透によるもの、侵食によるもの等、原因はさまざまであるが、浸透によるパイピングやすべり、河道流による堤外地の侵食については近年安全性照査法が導入されて、補強対策の優先度を検討したり対策方法を検討したりする際に利用されている（国土技術研究センター、2002、204）。しかしながら、越流による破堤のメカニズムは十分には解明されておらず、また、現行の河川管理施設等構造令（以下「構造令」（政令）という）では「計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対して安全な構造とする」ことを堤防構造の原則としているため、超過外力に対して越流による決壊を生じさせないような堤防構造の指針とか対策は高規格堤防を除けば通常の堤防では定められておらず、越水に対して決壊しないようなあるいは決壊しにくいような堤防設計ができる段階ではないことが、越水破堤に対する堤防強化がなかなか進まない一因ではないかと思われる。

一方で、堤防から河川水が溢れることを前提として、ソフト対策で「人の命は守る」といった流域治水の考え方が唱えられているが、溢れば破堤の危険性は高まるために堤防強化は必須であるが、どのような対策でどの程度堤防強化が図られるのかほとんど分かっていない。

河川堤防は地震動による液状化等でも被災するし、津波の河川遡上による侵食でも被災することは平成 23（2011）年の東北地方太平洋沖地震で経験してよく知られていることである。河川堤防の健全性は洪水のみならず地震外力に対しても担保されなければならない、多くの研究分野の英知を結集して強化対策を図る必要がある。

以上のように、河川堤防が決壊する誘因が複数あり（洪水、地震、津波など）、また、それによって破堤に至る原因も多岐にわたっていることから、ここでは、水工学的に重要であると考えられる河川洪水の越水による破堤に焦点を絞り、破堤のメカニズムについて簡単に述べるとともに、破堤現象のシミュレーション手法について、著者らの研究成果を参考にしながら紹介するとともに、越水破堤に対する堤防強化対策について述べてみたい。



## 2. 河川堤防について

沖積平野に住居を構え、そこで生産活動をするには、生命と資産を洪水から守る堤防の建設が必須である。淀川流域では約1,600年前に、茨田（まんだ）の地の住民が幾度となく洪水で苦しんでいる様子を見て、仁徳天皇が堤防を築かせたと記紀に示されているのが、我が国で最初の堤防建設の記録だと言われている。茨田堤の位置については諸説があるが、現在の門真市内にある堤根（つつみね）神社境内に「茨田堤」の史跡を見ることができる（国土交通省淀川河川事務所ホームページ）。

その後は豊臣秀吉が伏見城の築城に伴い、巨椋池に直接流れ込んでいた宇治川の川筋を北側に付け替えた際に築いた「太閤堤」（図-2において、宇治から向島までの「槇島堤」、宇治から小倉までの「藪場堤」、小倉から向島までの「小倉堤」の長さ12kmにわたる堤防の総称）や、同じく豊臣秀吉が1594年に毛利輝元、小早川隆景、吉川広家の諸大名に命じて淀川左岸に築かせた「文禄堤」（現在の大阪府枚方市から大阪市長柄までの全長約27kmに及ぶ堤防で、堤防上に伏見城と大坂城を結ぶ道路を造らせた。現在も京街道としてその名残がある（淀川資料館ホームページより））がこの時代の堤防としてよく知られている。江戸時代に入って、利根川の東遷事業や大和川の付け替え工事などで長大な河川堤防が築かれ、その後、洪水のたびごとにこれらの堤防を嵩上げし、腹付けを繰り返してきた歴史的河川構造物が現在の堤防である。



図-1 堤根神社境内にある史跡「茨田堤」(<https://www.yodogawa.kkr.mlit.go.jp/know/rekisi/kakawar.html>)

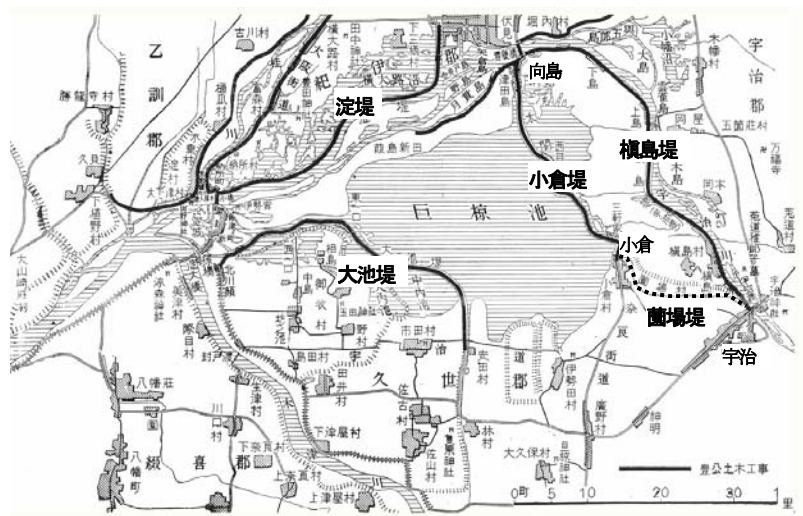


図-2 豊臣秀吉による太閤堤（巨椋池干拓誌，1981）

### 2. 1 河川堤防の現状

計画高水流量に応じて確保すべき堤防の基本形状（高さ、天端幅、法勾配など）が構造令で規定されている（形状規定方式）。小段のある従来の標準的な堤防断面を図-3に示す（国土交通省近畿地方整備局）。このような形状規定方式による堤防の設計は、簡便で効率的であり、長年の経験を踏まえたものであることから、堤防整備の基本としてこれまで十分に役割を果たしてきたといえる。一方、堤防の洪水に対する安全性を評価するのは結構難しく、対策法の検討等のためには、堤防の設計においても一般の構造物の設計法と同様、外力と耐力の比較を基本とする安全性照査法の導入が強く求められた。その結果、「河川堤防の構造検討の手引き」が平成14（2002）年7月に財団法人国土技術研究センターから出され、浸透、侵食、地震に対する堤防の性能照査方法の基本的な考え方や手順が示されるに至った（2012年2月に改訂されている）。

ところが、平成16（2004）年には梅雨末期の集中豪雨や上陸数が10個に及んだ台風による豪雨等により全国各地で破堤氾濫が発生するなど、破堤氾濫がその後も頻発した。そして、平成24（2012）年7月に発生した九州の豪雨災害で矢部川の堤防が決壊したことを受けて、国土交通省が全国109の一級水系の国直轄の河川堤防を緊急点検した。その結果、直轄河川堤防延長13,400kmのうち、洪水等

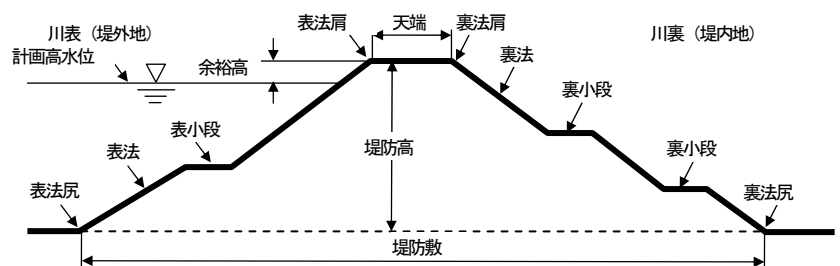


図-3 従来の標準的な堤防断面形（現在は原則として1枚法）

2014年度（第50回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 14-A-5

フリーソフトiRICを用いた河川の流れ，  
河床変動，河岸浸食予測の実践

北海道大学 教授

清水康行

北海道大学 学術研究員

久加朋子

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014年8月

# フリーソフトiRICを用いた河川の流れ，河床変動，河岸浸食予測の実践

## Practice of numerical calculation of the flow, sediment transportation and bed validation using the free iRIC software

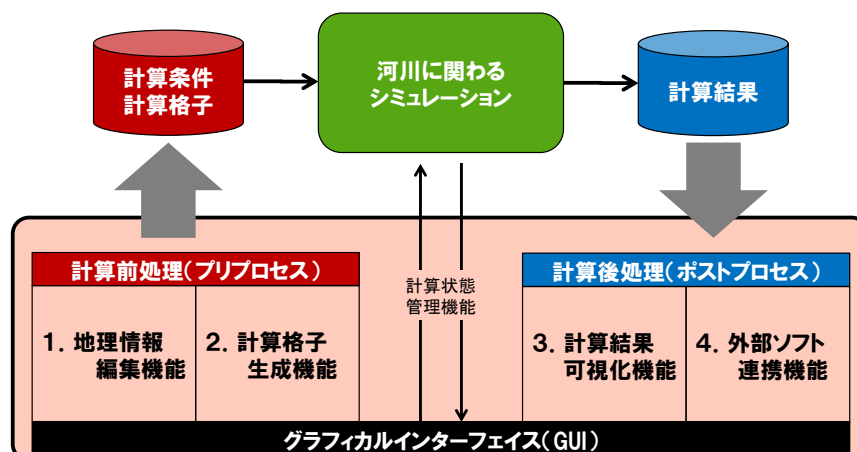
清水 康行, 久加 朋子  
Yasuyuki SHIMIZU, Tomoko KYUKA

### 1. はじめに

iRIC (International River Interface Cooperative) とは，世界中の研究者や技術者，行政担当者，市民らの「河川にかかわる技術や事業，考え方」に対する相互理解促進を目的とする，数値シミュレーション技術を軸とする国際的な共同体である。iRICでは，ユーザーインターフェースを備えた数値解析ソルバー (iRICソフトウェア) を無償提供すると共に，開発者とユーザーが情報交換する場を提供している。

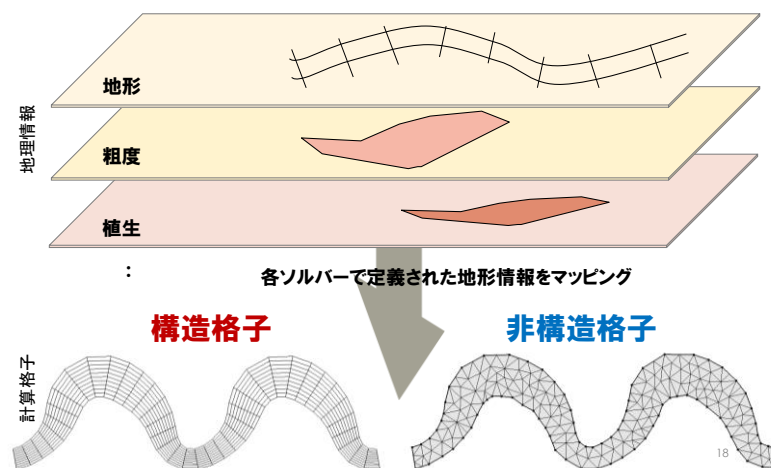
iRICソフトウェアが備える主な機能は，**図—1**に示す通りである。iRICソフトウェアは，計算前処理部分 (プリプロセス)，河川解析プログラム (ソルバー)，計算後処理部分 (ポストプロセス) の三つの要素が，GUIにより結合された構成となっている。プリプロセスでは，地理情報編集機能と計算格子生成機能が搭載されている (**図—1**)。地理情報として読み込めるデータの種類には，河川測量データと座標点標高データがある。その他にも背景画像を読み込み，その情報を参考にGUI上でポリゴンを作成することで，粗度係数の値や高水敷と低水敷，複雑な形状の植生域や構造物の位置などを指定することができる。一方，計算格子生成機能では，**図—2**に示す構造格子や非構造格子，その他にも直線水路，蛇行水路 (サインジェネレイティッドカーブ，木下カーブ)，ジグザグ型の水路形状など，「多機能格子生成ツール」によって規則的な形状を有する水路の計算格子を作成することができる。その後，**図—2**のように，各計算格子に上述した地理情報の属性をマッピングして与えることができる。

一方，ポストプロセスでは，計算結果を可視化することができる (**図—1**)。可視化のためのウィンドウは，二次元可視化ウィンドウと三次元可視化ウィンドウ，一次元グラフの3つが用意されている。これらの主な可視化機能は，計算結果 (水深や河床高などのスカラー値) のカラーコンター表示，流速ベクトルの表示，流線表示，アニメーション機能によるコンター図の動画やパーティクルトレースの表示等である。さらに，iRICソフトウェアでは，計算結果を他のソフトウェアに対応したフォーマットでエクスポートし，その他の商用ソフトやフリーソフトを用いて計算結果を可視化することも可能である (外部ソフト連携機能)。



図—1 iRICソフトウェアの基本構成 (<http://i-ric.or.jp/>)





図—2 計算格子生成機能と地理情報マッピングのイメージ

## 2. iRIC の平面二次元ソルバーNays2DH

### 2.1. Nays2DH の概要

iRIC Ver2.2に搭載されているソルバーの一覧を表—1に示す。Nays2DHは、河川における流れ、河床変動、河岸侵食の計算を行うため、2014年6月からiRIC Ver.2.2 に搭載された新しい平面二次元ソルバーである。従来のiRIC (Ver.2.1以下) には、平面二次元ソルバーとしてNays2D, Morpho2D, FaSTMECH 等が搭載されていた。Nays2DHとは、複数のソルバーによる混乱を避けるため、既存ソルバーのNays2D (北海道大学の清水康行により開発された平面二次元の河床変動ソルバー) とMorpho2D (京都大学の竹林洋史により開発された平面二次元ソルバー) を統合し、より多機能でユーザー要望に幅広く対応できるように開発されたものである。

表—1 iRIC に搭載されるソルバーの一覧

計算条件	構造格子	非構造格子	格子なし
1次元流れ	CERI 1D		
2次元流れ, 河床変動	Nays2DH	Mflow_02	
	FaSTMECH	SToRM	
	Delft flow (流れのみ)	River2D (流れのみ)	
	NaysEddy		
3次元流れ, 河床変動	NaysCUBE		
氾濫解析	Nays2DFlood	SToRM	
流出解析			SRM
津波解析	Elimo		

【iRICソフトウェアの歴史】 iRICソフトウェアとは、(財)北海道河川防災研究センターで開発してきたRIC-NaysとUSGS (アメリカ地質調査所) で開発してきたMD\_SWMSの機能を統合した河川の流れ・河床変動解析ソフトウェアである。日米の両ソフトウェアはそれぞれ長所と短所を有していたが、目指すところはほぼ同じであったことから、2つのソフトウェアを合体する日米共同プロジェクトがスタートし、2010年4月にiRIC Ver.1.0がリリースされた。しかし、これは両者の単純な合体にすぎず、汎用ソフトウェアとしての完成度は高いとはいえず、使い勝手や安定性においても課題が残されていた。そこで、2012年5月、iRIC Ver.2.0が満を持してリリースされた。iRIC Ver.2.0は、iRIC Ver.1.0とは全く異なるGUIを備え、使い勝手や安定性な

2014年度（第50回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 14-A-6

# 減災型治水に求められる河川技術の 展望と課題

九州工業大学 教授

秋山壽一郎

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014年8月

# 減災型治水に求められる河川技術の展望と課題

## Prospects and Issues for River Engineering to Reduce Flood Disaster Risk

秋山 壽一郎

Juichiro Akiyama

### 1. はじめに

雨水が集まる河川を中心とした治水対策は、確実な効果が見込める効率的な洪水処理方式である。ところが近年、計画の規模を上回る豪雨や想定と異なる豪雨の発生確率が増加し、河川を中心とした対策だけでは洪水処理が難しくなっている。また将来的にも温暖化による治水安全度の目減りや洪水処理能力に関する不確実性の増大が懸念されている。そのような危機感から、“連続堤防などの治水施設によって浸水被害を防ぐ防災型の治水方式”から、“浸水被害の発生を想定して被害軽減を図る減災型の治水方式”へ、治水の基本パラダイムの転換を求める声が高まっている。

本稿は、“これからの治水”として減災型の治水方式が観念的に論じられることが多いことに鑑み、近年の水災事例から見てくる現行及び減災型の治水方式の課題を整理したうえで、減災型の治水方式を実効性のある治水方式とするために求められる河川技術(シミュレーション技術)とその技術的課題について述べたものである。また、そのような治水方式は技術だけでは成立しないことから、必要に応じて仕組(法, 制度)についても触れている。

本題に入る前に、本稿における「減災型治水」「流域を取り込んだ減災型治水」「治水バランス」「水災リスク」の意味(定義)を明確にしておきたい。

- ・「減災型治水」とは、“内外水の浸水シミュレーションから想定される水災リスクを評価軸として、実効性・経済性を考慮したうえで、治水バランスが取れたハード対策とソフト対策により浸水被害の軽減を図る治水方式”のことをいう。また、「流域を取り込んだ減災型治水」とは、“オンサイト・オフサイト貯留、氾濫原規制などの流域の対策群を含む「減災型治水」”のことをいう。なお、減災策の一つである氾濫許容については、「させる/させない」といったパラダイムが先にあるわけではなく、把握されるリスク次第で一定レベルの氾濫許容も選択肢としてあり得るという考え方に立っている。
- ・「治水バランス」とは、“流域の治水システム(治水施設群)のみならず、治水機能を有する各種の人工・自然的要素が有する内外水の処理能力のバランス”のことをいう。したがって、河川、洪水調節施設、排水機場、下水道などの治水施設やオンサイト・オフサイト貯留などの流域の治水施設に加え、盛土構造物、森林、水防林などの治水機能を有する各種の要素、また把握されるリスク次第では一定レベルの氾濫許容も治水バランスの対象となる。なお一般に、治水施設の治水安全度のバランスのことを「治水バランス」というが、ここではそれを狭義の治水バランスとみている。
- ・「水災リスク」とは、“降雨外力の不確定性を前提とした多様な想定シナリオのもと、治水バランスが対象とする各種の治水施設や自然的要素などを考慮した内外水の浸水シミュレーションに基づき、浸水被害の程度を評価軸として把握されるリスク”のことをいう。なお一般に、水災リスクは内外水の浸水による水災の発生確率とその被害規模の組合せで表現されるが<sup>1)</sup>、そのような評価は任意の降雨外力から浸水被害を再現・予測できれば可能なので、ここでは単に浸水被害が発生する可能性を水災リスクと呼んでいる。

では、現行の治水方式(完全治水)において水災リスクはどのように捉えられているのであろうか。一般に水災は被害をもたらす外力としての降雨特性(強度, 継続時間, 空間分布), 洪水処理の対応能力としての治水能力(ダムなどの洪水調

節容量, 河川の流下能力, 下水道などの排水能力など), 及び被害を受ける対象物のダメージポテンシャル(一般資産費被害額など)の3者の関係ではほぼ決まってくる. この関係を現行の治水方式に当てはめれば, 流域の総雨量(=強度×継続時間)から洪水処理能力の規模を決め, 治水経済調査マニュアル(案)<sup>2)</sup>で定められた便益B/コストCにより, 治水施設の整備によってもたらされる経済的な便益や費用対効果を計測する方法となっている. このような2段階構成となっているのは治水経済が後から導入されたからに他ならないが, それはともかくとして, 治水経済では実際の便益Bの一部しか計測されないものの, 考え方としては便益Bを介してダメージポテンシャルを考慮した形になっている. 治水事業の妥当性の目安である  $B/C=1.0$  はダメージポテンシャル=治水能力の設定規模であるので, 降雨外力, ダメージポテンシャル, 治水能力の関係はいちおう整合が取れた形になっている.

以上からわかるように, 現行の治水方式の計画法とダメージポテンシャルの計測法では水災リスクは表に出てこない. これは, 外力が計画の規模を上回った場合や想定と異なった場合のリスクを想定外と見ているからである. しかし実際は, 計画規模の範囲内でも内水と外水の治水バランスが悪い場合, 短時間集中豪雨が発生した場合などでリスクは発生しえるし, また計画規模を上回った場合のリスク把握についても危機管理の視点から見れば必ずしも必要十分とはいえない. なお, 2000年9月東海豪雨災害を受けて, 辻本が中心となって取りまとめた報告書<sup>3)</sup>は, 多様なシナリオを想定した浸水シミュレーションに基づき浸水情報のあり方を示したという点で真に注目すべき成果である.

さて, 筆者は, 後述するように, 「流域を取り込んだ減災型治水」では「治水バランスの評価」「水災リスクの把握」「説明責任と合意形成」の3つが重要と考え, 「減災型治水シミュレータ」(以下, 「本シミュレータ」という)の開発に取り組んでいる. 本シミュレータが目指すゴールは, 多様な想定シナリオのもと, 「治水バランス」の対象となる種々の要素を考慮して, 実態に近い姿で雨水動態を再現・予測できる“パイロット訓練用のフライト・シミュレータ”のような河川技術である. しかしその実現のためには, 通常の洪水氾濫解析ではあまり注意が払われていない雨水動態にも目を向ける必要がある. 例をあげれば, 治水バランス評価とリスク把握では洪水の流量・水位の評価が最も重要であるので, 破堤/越水, 洪水調節, 分合流などの洪水流量に関係する要因, 河道内樹木群や洪水時の粗度係数・河床変動など, 洪水水位に関係する要因を視野に入れた開発が必要になってくる. これはたいへん厄介なことであるが, そのような検討も可能な範囲で進め, その成果を順次取り込む形で段階的にシミュレータを発展させている. したがって, 本シミュレータは発展途上にある.

以下, 第2章では主要な豪雨災害から近年の水災の特徴と課題を抽出し, 第3章では抽出された課題を踏まえて, 「減災型治水」「流域を取り込んだ減災型治水」としての課題を指摘する. 第4章では現時点における本シミュレータの概要を説明し, 第5章ではその検証・適用例をいくつか紹介する. 第6章では「減災型治水」において最重要な技術的課題を示し, 本稿のまとめとする.

## 2. 近年の豪雨災害の特徴と課題

自然の働きに大きく左右される自然災害は, 過去の災害から倒叙的に学び教訓とすることが重要である. ここでも近年の水災の特徴と課題が何かを知ることから始めたい.

表 2-1 は, 「2000年9月東海豪雨災害」以降に発生した主要な豪雨災害で指摘された重要課題を示したものである. 降雨状況や流域特性などの理由から各水災に固有の課題も見られるものの, 共通した課題が多いことが理解される. この共通した課題を抽出し, 近年の水災の特徴と課題として整理したものが表 2-2 である. このうち, 「想定をはるかに上回る豪雨への対応」「短時間集中豪雨への対応」は, 現行の治水計画の対象降雨の考え方や財政的な制約などからハード対策による対応は困難と考えられるので, ソフト対策の課題として整理した.

表 2-2 のような上下流/本支川や内水/外水処理の治水バランス, 中小河川の越水・破堤, 下水道・排水機場の処理能力といったハード対策の課題は, 近年の外力規模や財政的な制約を考えれば, 現行の治水ではすぐには解決が難しい問題である. では, 「減災型治水」や「流域を取り込んだ減災型治水」であれば解決可能かといえば, それを実効性のある治水方式としていくにはいくつか解決すべき技術的課題がある.

2014 年度（第 50 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 14-A-7

# 大規模洪水に適応可能な河道設計と 河道管理

中央大学 教授

福岡捷二

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014 年 8 月

## Techniques of River Design and Management Adapted for Large Floods

福岡 捷二  
Shoji Fukuoka

### 1. まえがき

河川は多様な機能を有している。流域に降った降水は集まり河川となり、流下の過程で人間活動や川の生物の生息、生育、繁殖の場として利用され、また、優れた自然景観を創り出している。時には、大雨によって大洪水となり、河川流域に甚大な災害を及ぼすことがある。

アジアモンスーン地帯に位置する我が国にあっては、河川の設計や管理の主要な外力は大規模洪水流である。大規模洪水流が発生した時、河道がどのように応答し、洪水を下流に伝播させるかといった機構を理解することは、河川の適切な設計・管理の上で重要である。このために、洪水流について現地河川での観測と解析的研究が進められている<sup>1),2)</sup>。

洪水の規模は、計画の規模を超えるものから計画内に収まるものまで大小さまざま発生する。本文で対象とする「大規模洪水」は、計画高水位の近辺で流れる洪水であり、外水が河道から氾濫する洪水は対象としていない。その理由は、河道の計画、設計、管理において、最も大切なことは、計画、設計規模内で流れる洪水外力に対し、河道の有する実力を正しく評価し、問題個所があれば改修し、適切に河川管理をすることであると考えられるからである。河道の持つ実力は、洪水流の下流への伝播、変形を考慮した洪水流の理解に基づいた確かな技術力で評価されなければならない。確かな技術力が満たすべき項目は多いが、なかでも、大規模洪水が安定的に流れる河幅、断面形を決める技術力、また洪水流と土砂移動を高精度で、統合的に解析できる技術力、河道とともに一体的に大規模洪水流に適応する遊水池、放水路等の治水施設の実力を的確に評価できる技術力等が河川管理者、技術者、研究者の基本的な技術として求められている。本文では、洪水流の水面形の時間変化データを観測し、この観測データを用いることにより、大規模洪水に対する河道の設計・管理に資する新しい技術を創出し、それらが実務にとって有効であることを示す。

洪水流に適応する河道設計、河川管理が扱うべき範囲はハード、ソフトの両面に及び広い。これらの課題については、著者はこれまで、総論<sup>3)7)</sup>、基調講演<sup>8)11)</sup>等の形で考えを述べてきた。本文では、紙数の関係でこれらの既発表の論文との重複を出来るだけ避け、新しい重要な技術課題に絞って詳述している。本文と併せてこれらの論文を読んでいただきたい。

### 2. 河道を流下する洪水流と土砂移動

#### 2.1 洪水流、土砂移動の観測

昭和50年代以降、河川の洪水流、河床変動等の現地観測結果は、主に、国の機関に蓄積されてきた。しかし、これら河道設計上、河川管理上重要な課題に対する学術面からの支援は、十分といえるものではなかった。事実、水理学、河川工学等で扱われる洪水流の研究は、実現象からかい離しているものが多かった。この理由は、洪水流は、非定常性が弱く準定常流でかつ疑似等流的な流れの取り扱いが出来ると考えられていたこと、治水計画ではピーク流量やピーク水位が重要であり、それらが分かれば、おおよそ計画を立てることが出来たこと、洪水観測の労力が大きいこと、また、観測された洪水データが利用しづらい状況にあったこと等が関係していたように思う。し

かし、洪水流に関する最近の研究<sup>2)</sup>から、河川の洪水流の準定常、疑似等流の仮定は、洪水流を表面的に見たものであり、洪水流の非定常性、不等流性がきわめて本質的な特性であり、このことを考慮に入れた河川の計画、管理が重要であることが明らかにされた<sup>1)</sup>。

一方、洪水中の土砂移動量については、その測定の難しさから、調査研究はきわめて少なく、実質的にほとんど行われてこなかった。一般には、洪水前後の河床高の測量結果の値の差から、河床高の変化を推定することが行われているが、洪水中の流砂量や河床高の変化については、一部の河川での観測を除いて、ほとんど理解できていない状態で、計画、管理が行われているのが実状である。

しかし、後述するように、近年、多くの河川で、縦断的に圧力式水位計が多地点に設置され、観測された洪水流の水面形の時間変化データ等を用いた洪水流—河床変動解析から、洪水流の変形・伝播特性とそれに伴う河床の変動過程が実用的な精度で求められ<sup>10)-12)</sup>、計画、管理に徐々に生かされてきている。

## 2.2 洪水流・土砂移動解析技術の課題

古くから、河川技術の改良は、現場での観測に基づいて行われてきた。河川技術を改良する大きなきっかけは、洪水による河川災害の発生による人命や資産の損失に対する、再度災害の防止にある。改良された河川技術は、現地で施工され、その効果が確かめられると、データとともに技術基準として採用されることになる。しかし、河川で起こる多くの水理現象は、道路や橋等の人工公物と異なり河川ごとに、また、洪水外力ごとに異なるという特徴を持ち、これにこたえる普遍的な技術の確立には時間を要する。したがって、河川技術は、現地で起こった現象をよく調べ、把握し、それに科学的な判断を加え、実地に応用され効果を上げている必要がある。近年は、洪水観測データが高密度に集められ、また精度の高い洪水流解析ができるようになったことから、洪水水理現象の理解が格段に増え、その結果に基づく技術も蓄積され体系化されてきた。それらの技術は、河川砂防技術基準<sup>1)</sup>に反映されており、技術力の向上が進んでいる。しかし、今なお、課題を抱えている多くの技術的問題は、洪水時に河川で起こっている洪水流と土砂移動の両者を一体的、統合的にとらえて構築する必要のある技術であり、これによって安全で維持管理が容易で、治水と環境の調和した河川本来の機能を発揮させる総合化された河川技術となる<sup>3)-7)</sup>。

## 3. 洪水流、河床変動解析の展開—観測水面形の時間変化を境界条件に与え、洪水流と河床変動を一体的に解くことの重要性

河川の計画、設計、管理には、大規模な洪水流とそれに対する河床変動の機構説明は特に重要である。従来行われて来たように、流れの運動方程式と河床変動の式を一緒に解く方法は、洪水中に起こっている河床高の変化を説明できているかどうかかわからないのが実態である。福岡は<sup>8)</sup>、観測された洪水流の水面形の時間変化には、河床高の時間変化が直接に反映することから、観測水面形の時間変化を適切に説明するように、運動方程式と河床変動の式を一体的に解き、各水面形に対応する計算河床高を、洪水中の河床高とする計算方法を提案し、これが実河川で有効であることを示した<sup>9)-12)</sup>。

従来、洪水流(開水路流)の水理学では、上流端で洪水流量ハイドログラフを、下流端水位ハイドログラフを境界条件に与えて、水位や流速場を時空間的に解く方法が一般的に用いられて来た。これは、河床高が洪水中にほとんど変動せず、河床面が固定床として扱えるようであれば、流量ハイドログラフを既知量として、水位ハイドログラフは未知量として解くことになる。

近年、水位が流量よりも高精度に、しかも多点で測れる時代となり、洪水流の水面形の時間変化を高精度で容易に求めることが可能になった。したがって、従来のように流量ハイドログラフを上流端の境界条件とするよりも、河床変動を含む縦横断面形の変化、河道貯留量、河道遊水量<sup>13)</sup>の変化に応じて時空間的に変化する情報を反映している観測水面形の時間変化を既知量とし、上流端境界条件、下流端境界条件を水位ハイドログラフで与え、流量ハイドログラフを未知量とする計算法が、河川の移動床問題では本質的であり特に重要である。福岡らは<sup>14)</sup>、このような考えのもとに、多くの河川で洪水流の水面形の時間変化を既知量とし、図-1に示すフローチャートに従

2014年度（第50回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 14-A-8

# 集中豪雨のリアルタイム観測・予測技術

京都大学 教授

中北英一

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014年8月



# 集中豪雨のリアルタイム観測・予測技術

## Real-time observations and predictions of localized heavy rainfall

中 北 英 一

Eiichi Nakakita

### 1. はじめに

ここ何年にもわたりゲリラ豪雨、そして梅雨前線・台風等による集中豪雨・大規模豪雨による鉄砲水・斜面崩壊、内水や超水氾濫による災害が生じ、以前にも増して社会の注意が払われるようになってきている。その注目の大きな理由は、最近あまり経験してこなかったと社会が考える規模や形態の豪雨や出水が生じていることと、10数年前からようやく防災関係者に認識されつつある地球温暖化、それによる影響ではないか？と社会一般でも思うようになって来ていること、一側面であるが、これらにあると考えることができる。

確かに、2011年の台風12号がもたらした長く続く豪雨による十津川流域の一連の深層崩壊や熊野川下流部での出水は希な現象であり、2013年の台風18号が桂川・宇治川・木津川上流域にもたらした地形性豪雨は3川同時という意味では希で、個々のダム諸元ぎりぎりの連携操作が実施されたと聞く。一方、梅雨期の集中豪雨では、1957年の諫早豪雨、1982年の長崎豪雨から、1993年の鹿児島豪雨、2003年の水俣豪雨、2012年の九州中・北部豪雨など九州での集中豪雨の頻度は高いが、日本海側での集中豪雨も目立つようになってきている。1972年、1983年の山陰豪雨が有名であるが、約20年を経て2004年の新潟・福島豪雨や福井豪雨、2005年の関川・姫川豪雨、2008年の石川豪雨、2012年の新潟・福島豪雨や2013年の山口・島根豪雨などその生起が目立つようになってきている。また、梅雨明け後に単独の積乱雲によってもたらされるゲリラ豪雨災害(鉄砲水災害)が2008年に神戸市の都賀川や東京都豊島区の下水道で生じて以来、都市域におけるゲリラ豪雨災害への社会の関心が急速に高まり現在に至っている。

### 2. 災害をもたらす豪雨

では災害をもたらす豪雨として、台風や低気圧による豪雨、梅雨時その他の集中豪雨、そしてゲリラ豪雨とよばれる局地的集中豪雨とではどこが違うのだろうか？図-1に示すように、台風による豪雨は1000 km四方の広がりですべて1日～数日の継続時間を持つので、数1000 km<sup>2</sup>より大きな流域をもつ河川でも洪水をもたらす危険性があり、大規模水害の想定対象でもある。もちろん土砂災害も生起する。一方、梅雨時の通常の集中豪雨は、100 km程度の長さで10～20 kmの幅をもち、6時間～半日程度継続するので、流域面積が100 km<sup>2</sup>オーダーまでの流域面積をもつ中・小河川および内水氾濫が問題となる。台風による豪雨と同様に土砂災害も生起する。ゲリラ豪雨は10 km四方の広がりですべて1時間以下の継続時間であるから10 km<sup>2</sup>程度の小河川や下水道内での鉄砲水、都市内水氾濫が問題となる。



図-1 災害をもたらす豪雨

で、流域面積が100 km<sup>2</sup> オーダーまでの流域面積をもつ中・小河川および内水氾濫が問題となる。台風による豪雨と同様に土砂災害も生起する。ゲリラ豪雨は10 km四方の広がりですべて1時間以下の継続時間であるから10 km<sup>2</sup>程度の小河川や下水道内での鉄砲水、都市内水氾濫が問題となる。

1. で述べたように、2008年の7月末、8月初めの神戸都賀川や東京雑司ヶ谷の下水道管での災害はゲリラ豪雨災害によってもたらされたものである。2010年7月初めに東京都北区での洪水・内水氾濫をもたらしたのもどちらかといえばゲリラ豪雨によるものとレーダー画像から推察している。一方、2008年の岡崎洪水災害、浅野川の洪水・土砂災害や2009年の佐用町洪水災害は集中豪雨によってもたらされている。2004年の新潟・福島豪雨災害や福井豪雨災害も通常の集中豪雨災害であり、2010年7月の中国地方や岐阜での災害もまたそうである。

### 3. 集中豪雨とは？

「ゲリラ豪雨」も「通常の集中豪雨」も積乱雲によってもたらされる。「大気が不安定」な時に発生し、縦方向のはるか上空まで発達し、何10万トンという水を上空に発生・蓄積させ、やがてはそれらを落して地上に豪雨をもたらす。いわば、大気の破壊現象である。図-2に示すように、典型的な集中豪雨では、最初に発生し移動しながら発達する積乱雲のすぐ後ろに繰り返し新たな積乱雲が発生し、赤ちゃん・幼稚園児・小中学生・高校生・大人の積乱雲による家族が形成される。一つの積乱雲の寿命は高々30分～1時間程度だが、積乱雲の家族が一旦形成されるとその家族は6時間以上の長きにわたり持続されるので、6時間～半日程度という長い時間の豪雨をもたらす。気象レーダーでは徐々にその家族が近づいてくるのがわかる。一方、ゲリラ豪雨は積乱雲の家族とは別に、晴れている中でも突然に単独の積乱雲が発生し急激に成長する。家族が形成されだすときの最初の赤ちゃん雲の発生と同じで、突然発生し、かつ急激に発達するので気づきにくく、レーダーでも予測が難しい。

以下、図-2に示す後方形成型の線状対流系と呼ばれる幼年期から成熟期にわたるいくつかの積乱雲群によって形成されている典型的な降水システムの例を示すとともに、ゲリラ豪雨（局所的集中豪雨）についても概説する。

#### 3.1 集中豪雨のきっかけ

上空に寒気、下層に湿潤な暖気がある場合、下層の大気が軽く上層は重いという、大気が（鉛直方向に）不安定な状況になる。このような状態の時は、何かのきっかけで、上昇気流が生起すると、さらに浮力が働いて上昇気流が加速される（微小変動による大気の不安定）。何かのきっかけには、大気下層の境界層による乱流上下運動、たまたまの水平風速の収束や、山岳による大気流れの強制上昇、山岳斜面や都市域で地表面が日射により局所的に熱せられて生じる熱的強制上昇などがある。この中で、境界層乱流の果たす役割については、大気モデルが高空間分解能になるに及んで研究上重要なプロセスとなって来ており、観測の上でもモデル化の上でもまだまだ未解明な部分が多い。加えて湿った空気が上昇し雲になる時に凝結熱が放出されるので、さらに浮力が強化される。また、微小な上昇気流では初期に浮力が働かない場合があるが、山岳などによる強制上昇とそれに伴う雲形成・凝結熱放出により上昇気流が周囲より暖かく（軽く）なる場合（潜在不安定）も浮力が働く。

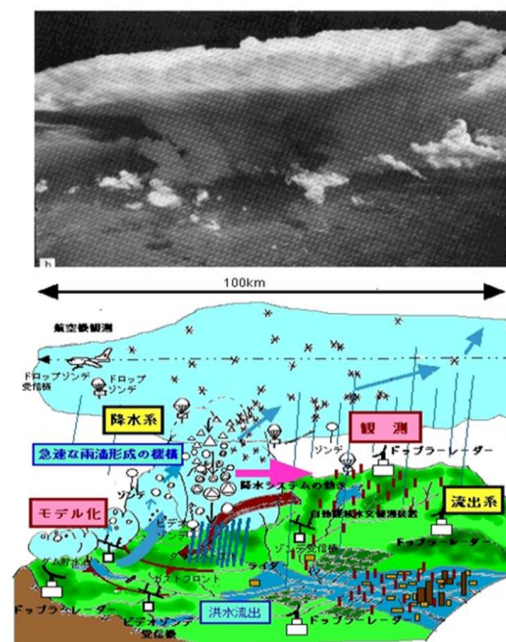


図-2 集中豪雨時の降水システム

#### 3.2 集中豪雨の成長・維持機構

成長・維持機構にはこの積乱雲に関するミクロなものと、積乱雲群によって形成される降水システム全体に関す