

2019 年度（第 55 回）
水工学に関する夏期研修会講義集

A コース

Lecture Notes of the
55th Summer Seminar on Hydraulic Engineering, 2019
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

2019 年 9 月
September 2019

2019 年度（第 55 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：気候変動適応に向けた水工学・防災技術

- A-1 力学的ダウンスケーリングによる台風ハザードの気候変動影響評価
京都大学 准教授 竹見哲也
Tetsuya TAKEMI
- A-2 スーパー伊勢湾台風来襲に備えた危機管理行動計画策定に向けた取り組み
国土交通省中部地方整備局 河川部 河川情報管理官
松尾 修
Osamu MATSUO
- A-3 粒子フィルタを用いた実時間流出予測手法
京都大学 教授 立川康人
Yasuto TACHIKAWA
- A-4 都市浸水に関する解析法とその活用
中部大学 教授 武田 誠
Makoto TAKEDA
- A-5 水災害に備える市街地のあり方
東京大学生産技術研究所 教授 加藤孝明
Takaaki KATO
- A-6 災害ごみの最新の知見とその対策
名古屋大学減災連携研究センター 准教授 平山修久
Nagahisa HIRAYAMA
- A-7 土砂・流木災害
立命館大学 教授 里深好文
Yoshifumi SATOFUKA
- A-8 2018 年西日本豪雨による河川災害の概要と課題
岡山大学 教授 前野詩朗
Shiro MAENO

2019 年度（第 55 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 19-A-1

力学的ダウンスケーリングによる 台風ハザードの気候変動影響評価

京都大学 准教授

竹見哲也

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2019 年 9 月

力学的ダウンスケーリングによる台風ハザードの気候変動影響評価

Assessment of the Impacts of Climate Change on Typhoon Hazards by Dynamical Downscaling

竹見 哲也

Tetsuya TAKEMI

1. はじめに

2018年は、冬季の豪雪、7月に発生した「西日本豪雨」、その後の猛暑、9～10月の台風21号・24号など強大な台風といったように、様々な極端な気象現象が発生し、全国各地で風水害が頻発した。「西日本豪雨」は、台風7号の通過ののち、梅雨前線の活発な活動により、西日本を中心にして中部地方や北海道地方を含めて全国各地で大雨による災害が発生した。また、台風21号は、最大発達時に中心気圧が915 hPaまで下がり、四国地方および近畿地方に上陸し、近畿地方を中心にして広域で暴風雨による災害が発生した。このような災害をいかにして防止・軽減するかは、短期的な視点と中長期的な視点とで整理して対策を考える必要がある。中長期的な視点で考える場合には、極端な気象現象が生起する気候場が変化すること、すなわち気候変動の影響を考慮し、気象ハザードが気候変動によりどのように変化するかを考えなければならない。ここでは、特に台風を例にとり、台風による気象ハザードに及ぼす気候変動の影響をどのように評価するかについて解説する。

2019年は、1959年9月に発生した伊勢湾台風から60年という節目の年にあたる。伊勢湾台風は、室戸台風(1934年)・枕崎台風(1945年)とともに「昭和の三大台風」として数えられる顕著な台風であった。過去においては、昭和の三大台風、さらには1947年カスリーン台風、1954年洞爺丸台風という1500名を超える犠牲者が生じた事象があった。中でも伊勢湾台風では、5000名を超える犠牲者があり、過去100年の間で風水害の中で最も多くの人的被害が生じた。その後、気象防災への取組みが進み、伊勢湾台風以前のように多くの犠牲者を生じさせるような台風災害というものは発生していない。しかし1993年以降では、風水害と雪害をあわせた気象災害による死者・行方不明者の数は減少しているとは言えず、毎年数10名から200名以上の方が気象災害により命を落としている(内閣府, 2018)。近年でも、2011年9月の台風12号による紀伊半島での豪雨災害、2014年8月に広島で発生した土砂災害、2016年8月の台風9・10・11号による北海道・東北地方での豪雨災害など、数10名の方が亡くなるという事象が発生している。そして2018年には、200名を超える犠牲者を発生させた西日本豪雨が発生し、風水害による犠牲者数という点で言えば、平成30年は平成最悪の風水害被害の年となった。

2018年の西日本豪雨や台風21号による被害は、あらためて気象防災のあり方を考えさせることとなった。台風21号にあつては、大阪湾沿岸で高潮・高波が発生し、また近畿地方の広域で強風が吹き、建築構造物の被害、樹木の被害、電力網への被害、飛散物による被害、さらには関西空港の浸水といった様々な被害が生じた。そのため、日本損害保険協会の2019年5月20日付公表(日本損害保険協会, 2019)によれば、この台風21号により生じた被害に対する各種損害保険の支払い総額は1兆678億円に達した。この額は、風水害による保険金支払額のこれまでの歴代第1位であった1991年台風19号の際の5680億円をはるかに超えるものとなった。伊勢湾台風から60年経ったいま、今後60年先を見据え、気候変動の影響を的確に把握し、今後起こり得る次の「伊勢湾台風」のハザードを理解し、想定される被害を的確に把握することが大切である。

ここでは、最初に、地球温暖化が台風に及ぼす影響を概観する。次に、力学的ダウンスケーリングおよび擬似温暖化実験の手法を用いた台風ハザードの気候変動影響評価の方法について述べる。伊勢湾台風をはじめ、いくつかの台風を対象として解析した結果をまとめる。最後に、今後の力学的ダウンスケーリング手法の展開について述べる。

2. 地球温暖化が台風に及ぼす影響

台風の発生に適した条件は、大気と海洋のそれぞれの条件によって決まる。地球温暖化が台風に及ぼす影響を理解するためには、これら大気と海洋の条件がどう変化するかを把握する必要がある。

まず大気の状態から考えてみる。地球温暖化とは第一義的には地上気温の上昇のことを指すのが一般的である。ところが高度方向で見ると、気温上昇の幅は、対流圏内では地上よりも上空ほど大きくなることがよく知られている。夏の高気圧に覆われた関東地方での局地的な降水の発生条件の地球温暖化による変化を調べた研究によれば、日本においても同様に気温上昇幅は地上よりも上空のほうが大きいことが分かった (Takemi et al. 2012)。このことから、地球温暖化が進むと、対流圏の気温減率は小さくなり、大気は安定になると予測される。すなわち、台風の発生を抑制する方向に進むのである。一方、Takemi et al. (2012) による同じ研究によれば、大気の相対湿度は温暖化によって有意な変化はないことが示された。このことから、相対湿度の条件の変化が台風の発生に及ぼす影響は顕著ではないものと考えられる。

一方、海洋の状態を考えると、海面水温は温暖化とともに上昇する。上昇の傾向は地上気温と同様であり、低緯度よりも中高緯度ほど上昇幅は大きい傾向にある。海面水温が高くなると、海面から大気に熱や水蒸気の供給が活発となり、台風は発達しやすくなる。よって、海面水温の条件で言えば、温暖化すると台風は発達しやすくなる。

さらに考慮すべきこととして、水蒸気量の変化が挙げられる。一般に、気温が高くなるほど飽和水蒸気量は多くなる。したがって、相対湿度が変わらないと仮定すれば、気温が上がるとともに大気中の水蒸気量は多くなるのである。将来の地球温暖化した気候では、対流圏全層にわたって気温が上昇すると予測されており、また相対湿度には有意な変化がないことを考えると、温暖化とともに大気中の水蒸気量は増加することになる。一般に、水蒸気量が増加すると、積乱雲の発達強化されるため、台風が積乱雲の集団であることを考えると、台風も水蒸気量が多いほど発達しやすくなる。温暖化による水蒸気量の増加は、気温減率の低下という安定化の効果とは相反する効果である。このように、大気の状態でも促進効果と抑制効果の双方がある。

以上のとおり、温暖化の進行によって想定される大気と海洋の状態の変化に伴い、台風を発生・発達させる条件への温暖化の影響には、促進する方向と抑制する方向との双方の効果がありうるのである。大気状態に見られる大気の安定化という抑制効果と水蒸気量の増加という促進効果は、簡単に言えばそれぞれ次のようにまとめられる。大気の安定化により、積乱雲の発達は抑制され、積乱雲から台風への集団化も抑制され、したがって台風の発生頻度は全般的には抑えられる傾向になる。一方、水蒸気量の増加により、積乱雲や台風は一度発生すれば豊富な水蒸気量の供給を受けてより強く発達するのである。水蒸気量が増加すると、降水量が多くなる傾向にある。温暖化気候で台風が強まるかどうかは、大気安定化と水蒸気量増加の相反する効果に加え、海面水温や大規模な大気循環の変化の影響も受ける。これらの因子の微妙な関係のもとに、温暖化気候と台風の発生数や強さとの関係が決まるのである。

以下に、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) による第5次報告書 (AR5) などに基づき、現時点での知見を紹介する。IPCCによるAR5では、第1作業部会 (WG1) による報告書 (IPCC 2013) において、温暖化による気象の変化の物理的な側面についてまとめられている。WG1の報告書において観測された気候変動についてまとめた記述によれば、地球温暖化は確実に進行しているとされているものの、熱帯低気圧の活動度が前世紀から長期的に強化傾向にあるかどうかという点では未だ確信度は低いと評価されている。それでも確実性が高いと評価された海域は一部あり、北大西洋地区に限っては1970年代以降で見ると最強部類の熱帯低気圧の頻度と強度が増大していることはほぼ確実であると評価されている。しかし、北西太平洋地区を含む他の海域での熱帯低気圧の変化傾向は、長期的な観測値の不足や北大西洋とは異なる大気循環の様相から未だよく理解できていないのが現状である。

一方、第2作業部会 (WG2) による報告書 (IPCC 2014a, 2014b) では、将来の温暖化気候における影響評価や適応策についてまとめられている。この影響評価の前提となるのは、WG1の報告書でまとめられているような、気候を予測する数値モデル (気候モデル) による高い精度の将来気候の予測情報であるのは言うまでもない。この点

2019年度（第55回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 19-A-2

スーパー伊勢湾台風来襲に備えた
危機管理行動計画策定に向けた取り組み

国土交通省 中部地方整備局
河川部 河川情報管理官

松尾 修

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2019年9月

スーパー伊勢湾台風来襲に備えた危機管理行動計画策定に向けた取り組み

Action for Development of the Crisis Management Action Plan for Super Ise

Bay Typhoon Attack

松尾 修, 水谷 好伸

Osamu MATSUO, Yoshinobu MIZUTANI

1. はじめに

濃尾平野は我が国最大のゼロメートル地帯（海拔ゼロメートル以下の低平地）が広がっている（図 1）。1959 年（昭和 34 年）の伊勢湾台風では、東海地方の低平地を中心に死者・行方不明者 5,000 人を超える甚大な被害を受けた。本年は伊勢湾台風の来襲から 60 年の節目を迎えるが、幸いにして東海地方において伊勢湾台風を超える規模の災害は発生していない。しかし、近年の異常気象の頻発化や将来の気候変動を勘案すると、伊勢湾台風を超える規模のスーパー伊勢湾台風がこの地方を襲った場合は極めて甚大な災害の発生が危惧されているため、東海地方のゼロメートル地帯における関係機関の参画によりスーパー伊勢湾台風の来襲を想定した危機管理行動計画についての検討を行ってきている。

本稿では、濃尾平野が抱えるリスクに触れたのち、「東海ネーデルランド高潮・洪水地域協議会」の設立経緯や沿革等について紹介し、現行の危機管理行動計画の概要及び現在の取り組みについて紹介する。

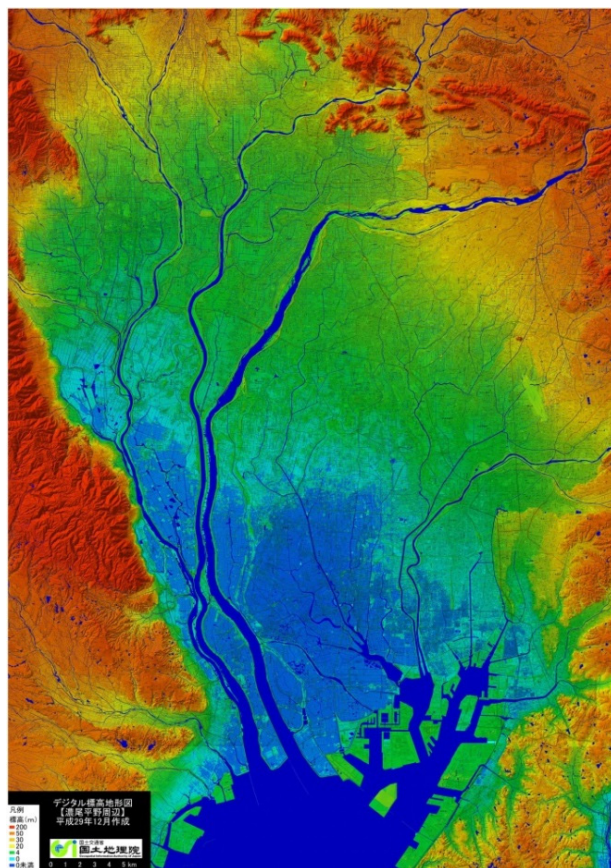


図 1 濃尾平野デジタル標高地形図（出典：国土地理院ウェブサイト 技術資料 D1-No. 878ⁱ）

2. 濃尾平野が抱えるリスク

(1) 濃尾平野の地域特性

伊勢湾に面した濃尾平野は、我が国有数の大河川である木曾三川（木曾川、長良川、揖斐川）や庄内川の河口部となっており、愛知県、岐阜県、三重県の三県にまたがっている。濃尾平野におけるゼロメートル地帯は336km²にも及び、浸水に対して非常に脆弱な地域である。ゼロメートル地帯の人口は約90万人にのぼりⁱⁱ、資産も集積している。

(2) 伊勢湾台風の概要ⁱⁱⁱ

1959年（昭和34年）9月26日夕刻に紀伊半島先端に上陸した伊勢湾台風（台風15号）では、台風災害としては明治以降最多の死者・行方不明者数5,098名に及ぶ被害が生じた。この台風による犠牲者は全国32道府県に及んだが、その83%は高潮の発生によって愛知・三重の2県に集中した（図2）。伊勢湾奥部（名古屋港）では、既往最高潮位を1m近く上回る観測史上最大の3.55mの高潮が発生し、それが不十分な防災対策のまま市街化してきたゼロメートル地帯の市街地部に来襲した。加えて、名古屋港内の貯木場に集積していた大量の木材が流出し、家屋や施設を破壊して多くの人命を奪った。伊勢湾台風による高潮災害の脅威は、その後の高潮対策を大きく進展させ、「災害対策基本法」制定の契機となるなど今日の我が国の防災対策の原点となっている。

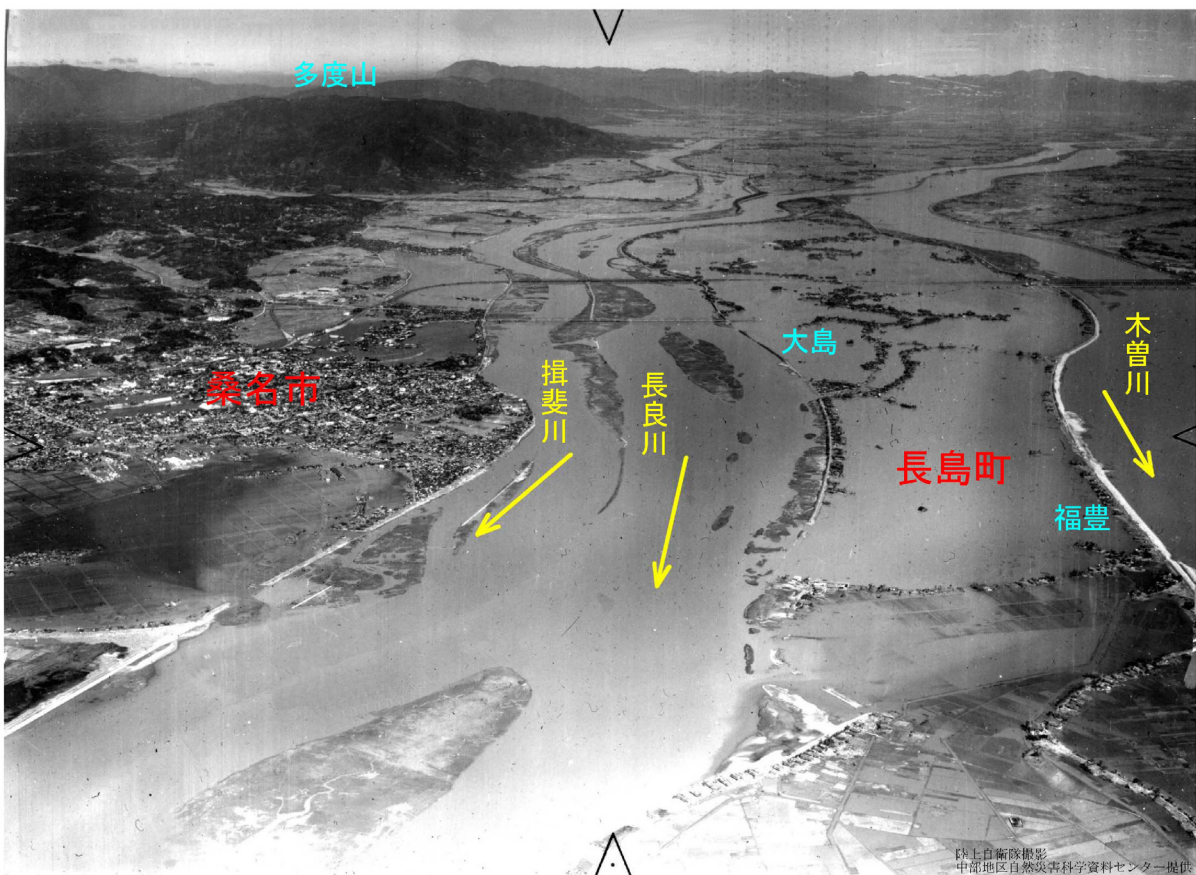


図2 伊勢湾台風時の木曾三川下流域の浸水状況
(撮影：陸上自衛隊、提供：中部地区自然災害科学資料センター^{iv})

2019 年度（第 55 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 19-A-3

粒子フィルタを用いた 実時間流出予測手法

京都大学 教授

立川康人

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2019 年 9 月

粒子フィルタを用いた実時間流出予測手法

A Real-time Runoff Prediction Method Using a Particle Filter

立川 康人

Yasuto TACHIKAWA

1. 概要

粒子フィルタを用いて、時々刻々、貯留量やモデルパラメータを推定しつつ河川流量を実時間で予測する手法を述べる。次に、粒子フィルタを導入した実時間流出予測手法の効果的な適用方法を検討する。まず、利根川上流域の菌原ダム流域 (492km²) を対象とし、システムノイズを加える状態量としてモデルパラメータ、貯留量、あるいはそれら両方を逐次更新する流出予測システムを考え、それらの予測精度を比較する¹⁾。次に岩鼻上流域 (1221km²) を対象とし、複数個所の観測情報を効果的に組み込む手法を比較検討する²⁾。以上の検討をもとに、流域を拡大して八斗島上流域 (5108km²) を対象とし、システムノイズを加える状態量 (流域貯留量、河川貯留量、あるいはそれら両方)、観測情報の導入手法、データ同化時間間隔を変えた予測システムを構成して、予測結果を考察する³⁾。降雨流出モデルは、国土交通省によって八斗島上流域で構築された貯留関数法⁴⁾を用いた。また、実時間流出予測システムは国土交通省国土技術政策総合研究所が開発した CommonMP^{5),6)}を用いて構築した。

2. はじめに

実時間流出予測へのカルマンフィルタの適用は、わが国では日野⁷⁾が単位図の逐次同定に応用したことに始まり、その後、星⁸⁾や椎葉ら⁹⁾、宝ら¹⁰⁾、河村¹¹⁾などがカルマンフィルタを用いた流出予測システムを開発し、それらは実務でも応用されてきた。カルマンフィルタを用いた流出予測手法は、状態量を確率変数と捉え、その確率分布を観測値が得られる毎に推定 (フィルタリング) して予測計算を繰り返す。この場合、状態量の時間発展を表現する状態方程式および状態量と観測値とを関係付ける観測方程式を線形化するために、非線形式を逐次、線形式で近似する拡張カルマンフィルタや統計的線形化フィルタが用いられてきた⁹⁾。

最近では状態量の確率分布を多数の計算値によるデータの集合 (アンサンブル) で表現してフィルタリングと予測計算を繰り返すアンサンブルカルマンフィルタ¹²⁾や粒子フィルタ^{12),13)}が水工学の分野でも用いられている。これらのフィルタでは、状態量の確率分布をアンサンブルで近似し、観測値によるデータ同化と予測計算を実現する。状態量の確率分布を多数の数値データで近似的に表すので、状態量 (初期値) の異なる多数の状態方程式を数値的に解いて、それぞれの次時刻の状態量が数値として求めればよい。そのため、これまで開発された水理計算や降雨流出計算プログラムをほとんど変更せずに実装することが可能であり、計算機アルゴリズムは並列計算機と親和性が高い。粒子フィルタは集中型流出モデルに導入した流出予測^{1),2),3),14),15)}や分布型流出モデルに導入した流出予測^{16),17),18)}、不定流計算モデルに適用した水位予測^{19),20),21),22)}などに用いられている。

粒子フィルタを導入した流出予測システムは既存の予測プログラムをほとんど書き換えずに構築することができ、柔軟なシステム構築が可能であるが、状態量の設定方法、システムノイズや観測ノイズの設定方法、粒子数、観測情報の導入手法やそれに関する尤度の設定方法およびサンプリング手法など、システム構成は自由度が高く、限られた予測時間内に適切な予測結果を出すためには、どのようなシステム構築が有効であるかを分析する必要がある。流域が大きくなると多地点の観測情報を入手することができ、それによって流域の多地点の予測精度が向上することが期待できるが、限られた時間内に適切な予測結果を出すためには、計算時間を勘案しつつ効果的なシステムノイズの設定方法や観測情報の導入手法を検討することが重要である。

本稿では、これらの課題に対して筆者らの研究グループが得た検討してきた結果を示す。3. では粒子フィルタを用いた実時間流出予測システムについて述べる。4. では利根川上流の菌原流域 (492km²) を対象として、モデルパラメータ、貯留量、あるいはそれら両方を逐次更新する流出予測システムを構築し、予測システムの動作と

予測精度を比較して、システムノイズを加える状態量の設定方法を考察する¹⁾。5. では5ヶ所の流量観測データが得られる岩鼻流域 (1221km²) を対象として、効果的な観測情報の導入手法について考察する²⁾。以上の検討結果をもとに、6. では我が国の大河川流域を念頭に置いて八斗島上流域 (5108km²) を対象とし、観測情報の導入手法、システムノイズを加える状態量、データ同化時間間隔の異なる流出予測システムを構築して予測精度を比較し、適切な流出予測システムの構築方法を考察する³⁾。以上の降雨流出予測システムは、国土交通省国土技術政策総合研究所が開発した水理・水文解析ソフトウェア統合型共通基盤 CommonMP^{5),6)} を用いた。

3. 粒子フィルタを用いた実時間流出予測システムの構築

利根川流域の八斗島上流域を対象として貯留関数モデルを用いた降雨流出モデルが国土交通省によって構築された⁴⁾。この貯留関数モデルをもとにした降雨流出モデルを CommonMP を用いて構築し、粒子フィルタを用いた実時間流出予測システムを開発した¹⁾。以下、用いた降雨流出モデル、状態空間モデル、粒子フィルタの導入方法を述べる。CommonMP を用いた予測システムの具体的な構成法は付録 I に示す。

(1) 降雨流出モデルと河川流追跡モデル

表層土壌の乾湿状態の連続的な変化を考慮する有効降雨モデルを考え、有効降雨強度 $r_e(t)$ を

$$r_e(t) = \begin{cases} f_1 r(t - T_L) & (0 \leq s_s(t) < R_{sa} \text{ のとき}) \\ r(t - T_L) & (R_{sa} \leq s_s(t) \text{ のとき}) \end{cases} \quad (1)$$

とモデル化する。ここで、 $r(t)$ は時刻 t の流域平均降雨強度、 f_1 は有効降雨を定めるモデルパラメータ、 T_L は遅滞時間、 R_{sa} は飽和雨量である。 $s_s(t)$ は有効降雨強度を定める表層土壌貯留高と考える。降雨強度と蒸発散強度 $e(t)$ を用いて、 $s_s(t)$ は連続式

$$\frac{ds_s(t)}{dt} = r(t - T_L) - e(t) \quad (2)$$

から得る。流域からの直接流出高は以下の連続式と貯留関係式でモデル化する。

$$\frac{ds(t)}{dt} = r_e(t) - q(t), \quad s(t) = kq(t)^p \quad (3)$$

ここで、 $s(t)$ は貯留高、 $q(t)$ は直接流出高、 k と p はモデルパラメータである。総流出量 $Q(t)$ は、直接流出高 $q(t)$ に流域面積 A を乗じた総直接流出量に基底流量 $Q_b(t)$ を加えて

$$Q(t) = Aq(t) + Q_b(t) \quad (4)$$

とする。河川流追跡モデルも貯留関数モデルを用いた。

$$\frac{dS(t)}{dt} = I(t) - Q(t), \quad S(t) = KQ(t)^P \quad (5)$$

$S(t)$ は河川区間の貯留量、 $Q(t)$ は河川区間下端からの流出量、 $I(t)$ は河川区間上端への流入量、 K 、 P はモデルパラメータである。

(2) 状態空間モデルとフィルタリング・予測計算

貯留量や水深などシミュレーションモデルの状態を表現する変数を状態量という。状態量の時間発展を記述するシミュレーションモデルと状態量と関連する観測情報を用いて、システムモデルと観測モデル

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{f}_t(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{h}_t(\mathbf{x}_t) + \mathbf{w}_t \quad (7)$$

を構成する。これらを合わせて状態空間モデルという。下付き添え字の t は離散的な時刻を表し、 \mathbf{x}_t は時刻 t の状態ベクトル、 \mathbf{y}_t は時刻 t の観測ベクトルである。 $\mathbf{f}_t(\cdot)$ は状態ベクトルの時間発展を表現するシステムモデル、 $\mathbf{h}_t(\cdot)$ は状態ベクトルから観測ベクトルを予測する観測モデルであり、これらは一般的に非線形のベクトル値関数である。 $\mathbf{f}_t(\cdot)$ と $\mathbf{h}_t(\cdot)$ の不確実性を表現するために、システムノイズ \mathbf{v}_t と観測ノイズ \mathbf{w}_t を導入する。これらはある確率密度関数 $p(\mathbf{v}_t)$ および $p(\mathbf{w}_t)$ に従う確率変数とする。

時刻 t までの観測ベクトルの集合を $\mathbf{y}_{1:t} = \{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_t\}$ とし、観測ベクトル $\mathbf{y}_{1:t}$ が与えられたとき、状態ベクトル \mathbf{x}_t の確率分布を推定することをフィルタリング(データ同化)という。フィルタリングによって推定された状態ベクトルを初期値として所定の時刻までシステムモデルを用いて予測計算を実施し、観測値が得られる毎にフィルタリングと予測計算を繰り返す。

2019 年度（第 55 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 19-A-4

都市浸水に関する解析法とその活用

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

2019 年 9 月

都市浸水に関する解析法とその活用

Analysis Model on the Urban Inundation and Its Application

武田 誠

Makoto TAKEDA

1. はじめに

平成27年の鬼怒川破堤氾濫に伴う大規模浸水や、平成30年西日本豪雨における高梁川・小田川の破堤氾濫に伴う大規模浸水のように、近年、広域かつ甚大な浸水災害が生じている。また、短期間および局所的なゲリラ豪雨による内水氾濫も増加している。外水・内水による浸水災害に対しては、ダムや流域内の貯留施設により雨水を保持し、河道で適切に洪水を流下させて、河川に隣接する遊水地で貯留するなどの総合治水対策が実施されており、都市域の内水排除のための下水道整備、貯留槽の建設も進められている。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に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⁴⁾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。

地下空間も含めた都市浸水の課題の検討を、戸田ら⁵⁾、川池ら^{6),7)}、関根ら^{8),9)}、秋山ら¹⁰⁾、尾崎ら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。例えば、関根ら^{12),13)}、石垣ら¹⁴⁾は、地下街の詳細な浸水状況とその時の避難についても検討している。ここでは、浸水解析技術に焦点を絞って論じる。

本報では、大規模な都市浸水に対する氾濫解析法、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、解析モデルの活用に焦点を当てた適用事例を紹介する。

2. 都市における大規模浸水に対する検討^{15),16),17)}

2.1 研究目的

平成27年の鬼怒川破堤氾濫に伴う大規模浸水の様子は、国土地理院による動画（UAVによる撮影）で保管されており、その被害の大きさを知ることができる。仮に、同様の大規模浸水が都市域で生じれば、その被害は甚大なものとなる。平成23年の台風15号による豪雨を受けて庄内川の水位が高くなり、志段味観測所では2000年の東海豪雨時より高い水位となった。名古屋市守山区下志段味地区では越水による浸水被害を受け、

さらに名古屋市民100万人に対して避難勧告が出された。このときは破堤には至らず、庄内川流域の名古屋市内の安全は保たれた。仮に、破堤に伴う大規模浸水が生じれば、地下街および地下鉄を有する名古屋市では深刻な被害が発生すると考えられる。武田ら¹⁸⁾により名古屋駅前の地下空間の入口情報が整理され、その結果は表-1のようにまとめられている。歩道が車道より20cm高いとすれば、入口は車道から0.5mの高さにあり、側壁天端の高さは車道から1mである。洪水ハザードマップをみると、名古屋駅周辺では、豪雨による内水氾濫で0.2m~1m、庄内川が破堤した場合の外水氾濫で1m~3mの浸水が予測されている。この場合、内水氾濫では入口に止水版を設置することで対応できると考えられるが、外水氾濫では止水板や側壁を乗り越えて浸水することが容易に想像できる。すなわち、大規模浸水が生じた場合、都市の地下空間に水が流入する可能性がある。著者らの研究グループでは、その危険性の評価を検討するために、地下空間を考慮した氾濫解析を実施した。

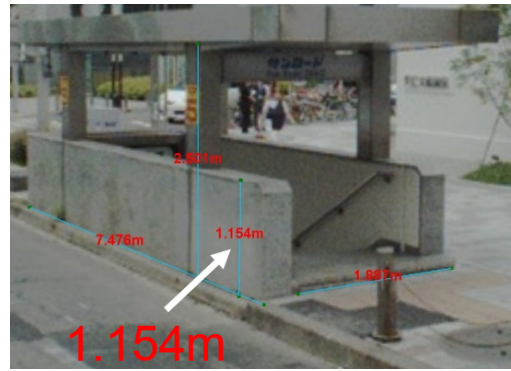


写真-1 入り口の様子

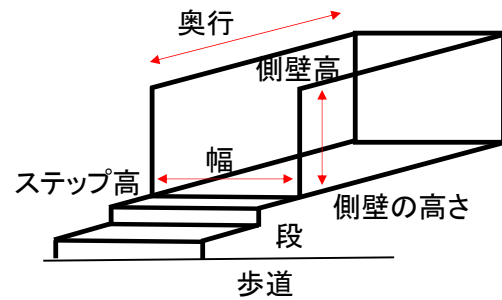


図-1 入口情報の定義

2.2 大規模浸水を対象とした都市浸水の解析法

(1) 河川

河川の解析では、以下の基礎式を用いる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - g \sin \theta + \frac{gn^2 u |u|}{R^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

ここで、 A は断面積、 Q は流量、 q は横流入量、 u は流速($=Q/A$)、 h は水深、 g は重力加速度、 θ は河床勾配、 n はマンニングの粗度係数、 R は径深、 x は距離、 t は時間である。

(2) 氾濫域

氾濫域の解析では、以下の浅水方程式を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = -q_o - q_{in} \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+z_G)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+z_G)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (5)$$

ここに、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速(m/s)、 h は水深(m)、 M, N はそれぞれ x, y 方向のフラックス($M = uh, N = vh$)(m^2/s)、 q_o は単位面積当たりの流出流量(m/s)であり、 $q_o = \sum q_n l_n / \Delta x \Delta y$ (q_n : 単位幅あたりの横流入流量(m^2/s), l_n : 格子にある河川区分の長さ(m), $\Delta x \Delta y$: 格子の面積(m^2)), q_{in} は単位面積当たりの地下空間への流入流量(m/s)であり、 $q_{in} = \sum Q_{in} / \Delta x \Delta y$ (Q_{in} : 後述する地下空間の入口での流入流量(m^3/s))、

表-1 入口情報の整理

	幅(m)	側壁の高さ(m)	奥行(m)	段(個)
平均値	1.8	0.91	7.3	1.9
最頻値	1.8	0.75	6.8	2
最大値	3.0	2.45	15.5	3
最少値	1.0	0.55	5.0	1

2019 年度（第 55 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 19-A-5

水災害に備える市街地のあり方

東京大学生産技術研究所 教授

加藤孝明

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2019 年 9 月

2019 年度（第 55 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 19-A-6

災害ごみの最新の知見とその対策

名古屋大学減災連携研究センター 准教授

平山修久

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2019 年 9 月

災害ごみの最新の知見とその対策

Cutting-edge Findings Related to Disaster Debris and Its Action

平山修久
Nagahisa HIRAYAMA

1. はじめに

2018年には、2018年1月から2月にかけての豪雪、2018年6月18日大阪府北部の地震、2018年7月西日本豪雨災害、2018年台風21号災害、2018年9月6日北海道胆振東部地震の自然災害が発生し、その後の災害廃棄物対応においてもさまざまな課題が生じている。また、2019年は、災害対策基本法制定の契機となるなど今日の我が国における防災対策の原点となった1959年伊勢湾台風から60年の節目の年となる。本稿では、災害廃棄物発生量推定方法の現状と展望¹⁾や南海トラフ巨大地震の災害対応リソース²⁾に関する研究成果を準用しながら、災害廃棄物に関する最新の知見、2011年東日本大震災以降の対策、ならびに今後の巨大災害に向けた課題について論述する。

2. 水害廃棄物、津波廃棄物の量の推定技術

2.1 既存の量的推計方法

災害廃棄物に係る量的推計手法については、以下の3つの要素に整理できる。過去の災害における処理実績値を基に原単位を推定する調査研究である。これらの研究は、結果として市町村の廃棄物部局の要処理量の原単位に関する研究である。ここでは、被害を代表する指標を乗じてマクロ的に算出するものである。次に、災害廃棄物の元となる物的資本のストックに着目し、その資材投入量、製品重量、廃棄時の重量から原単位を導出する研究がある。これは、市町村の廃棄物部局が処理する量ではなく、災害廃棄物として発生した時点における量の原単位に関する検討であり、物的資本の種類ごとに作成された原単位を用いて積算する。最後に、物的資本のストック量と災害情報から被害量を推計する方法に関する研究であり、建物等の財ごとにストック量の情報を面的に整理したうえで、各物的資本のストックが曝される災害強度を明らかにし、災害強度に応じてどの程度の被害が生じるかを表した被害率を乗じることで推計する。

2.2 水害の要処理量原単位

水害に係る要処理量の原単位は、平山、河田³⁾が示している。2004年に水害が発生した市町村の実処理量をもとに、災害廃棄物要処理量を被説明変数、全壊、大規模半壊、半壊、一部損壊、床上浸水、床下浸水の世帯数を説明変数とする重回帰モデル(N=48)により推計式を得ている。モデルの説明力は十分であるが、全壊の非標準化係数のみが5%水準で有意と認められなかった点が課題と指摘している。また、推計式を用いて得た予測値と実処理量の比較から、水害廃棄物量が1,000tを超える場合は高い精度で推計可能としている。

築谷⁴⁾は、本方法を用いて2004年台風23号により発生した兵庫県における水害廃棄物量を推計し、実処理量と比較したところ、被害が大きい市町で(水害廃棄物量が3,000t以上)では推計値/実処理量の値が0.78~1.14に収まっており、有効な方法であると報告している。田中ら⁵⁾も同様に平成26年福井豪雨災害で検証した結果、実処理量の0.91~1.68倍の推計値が得られたことから、災害廃棄物の全量を推計するための有効な手段であると評価している。一方で、鶴巻ら⁶⁾は紀伊半島大水害において実処理量と本原単位による予測値を比較したところ、予測値が実処理量の半分程度になると指摘している。また、平山⁷⁾は2005年8月のハリケーン・カトリーナ災害の事例で同推計方法を検証したところ、大きく過小評価となったことから、超大

規模、あるいは、長期浸水を伴う水害については原単位が異なる可能性を指摘している。

また、水害廃棄物対策指針⁹⁾では、平成13年度に水害経験自治体を対象に行ったアンケート調査の結果から、全99事例の80%で被災建物1棟あたりの災害廃棄物量が2t以下であったため、単位被害家屋あたり2t程度で算出すれば大きく外さない推計値が得られる可能性が高いとしている。また、比較的被災の程度が軽いケース（全被害家屋に占める床上浸水家屋の割合が50%未満）のみ集計すると、90%以上が2t/棟以下、100%が3t/棟以下の発生量であったと報告されている。

2.3 津波の要処理量原単位

津波災害の要処理量原単位については、東日本大震災の実績を基にした研究が進められている。2011年東日本大震災での津波被害とその廃棄物については、我が国が近代文明国家として発展して以来経験したことがないものであった。したがって、2011年3月11日の発災時点では、津波廃棄物の要処理量や津波堆積物量を推定する手法は明らかになっていない。平山ら⁹⁾は、2011年東日本大震災後に、津波による浸水域や浸水深の災害情報に基づき、住家被害を考慮した災害廃棄物発生量原単位を用いて、災害初動時に津波廃棄物の要処理量の推定を行っている。そこでは、2011年4月時点で、被災6県で約2,700万tと推定している。平山、大迫¹⁰⁾は、東日本大震災の災害廃棄物処理が完了した後、東日本大震災における宮城県、岩手県の被災市町村における実処理量を被説明変数、全壊棟数とその他半壊棟数（大規模半壊から床下浸水までの合計値）を説明変数とし、その他半壊の非標準化係数は全壊の20%という制約を設けた重回帰モデル（N=20）により推計式を導出している。この処理実績値には、住家から発生したもの以外にも、公共施設や非住家、通常の災害時には市町村で処理しない大企業由来の災害廃棄物等が含まれている一方で、海洋流出分やかき出し土砂（津波堆積物）、火災による消失物は含まれていない。本原単位は、災害廃棄物対策指針¹¹⁾に採用されている。

山中ら^{12,13)}は、平山、大迫¹⁰⁾と同様の考え方により、東日本大震災における宮城県、岩手県、福島県の被災市町村の災害廃棄物実処理量を基にした重回帰分析（N=35）により原単位を導出している。ここでは、全壊棟数、半壊棟数、一部損壊棟数を説明変数の候補とした複数のモデルで分析し、推定値の標準誤差等より比較検討したところ、全壊棟数と半壊棟数を説明変数とするモデルが適していると判断している。

鶴房ら¹⁴⁾は東日本大震災における岩手県、宮城県、福島県の被災市町村の実処理量データを用い、浸水面積を説明変数とする単回帰分析（N=32）により、単位浸水面積当たりの要処理量を示す原単位を得ている。また、地形により廃棄物発生量の傾向が異なり、原単位も大きく変わることを示している。

津波に係る上記の3つの要処理量原単位は、いずれも回帰分析から導出されており、モデルの説明力を示す決定係数と非標準化係数の統計的有意性からその妥当性を示している。

2.4 片づけごみの原単位

片づけごみの原単位については、災害時に各世帯から排出される量ではなく、平時において保有されている量の原単位が検討されている。田畑ら¹⁵⁾が18品目の主要耐久消費財に焦点をあて、普及率と1台当たりの重量（平均値、中央値、四分位数）から、財の種類ごとに質量原単位（1台当たりの平均的な重量）と、世帯当たりの保有量（kg/世帯）を求めている（例えば、冷蔵庫は61.00kg/台、71.68kg/世帯、いずれも中央値）。このうち、特定家電の質量原単位については、新潟県中越地震の実処理量（処理台数と処理重量の値）を用いて、実処理量と近い推計値を得られることが確認されている。

2.5 解体廃棄物の原単位

木造建築物の原単位については、高月ら¹⁶⁾は、阪神・淡路大震災後の被災建物解体現場で調査し（N=4）、家具等は殆ど持ち出した状態の木造家屋の解体廃棄物発生原単位を求めている。結果、最小値が0.62t/m²、最大値が0.71 t/m²という値を得られている。なお、本解体工事は庭の立ち木やブロック塀の一部も含まれていた点に留意する必要がある。橋本、寺島¹⁷⁾は、建築物解体廃棄物に係る既存の原単位が大きくばらついていることをふまえ、独自調査と既存調査の結果46件について原単位の内容を精査した。そのうえで、信頼性に

2019 年度（第 55 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 19-A-7

土砂・流木災害

立命館大学 教授

里深好文

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2019 年 9 月

土砂・流木災害

Sediment Disasters and Driftwood Disasters

里深 好文

Yoshifumi SATOFUKA

1. はじめに

気候変動の影響であると思えないような豪雨災害が近年頻発している。豪雨による洪水発生時には膨大な量の土砂と流木とが河道を流れ下り、それらの急激な堆積は河道断面の急変を生み、予測困難な洪水・土砂氾濫を引き起こしている。一般的な洪水氾濫解析において河床変動や流木の影響を考慮していない場合が多く見受けられるが、我が国の中山間地及び山麓地域を対象とする場合、そのような解析は意味をなさないといえよう。ここでは土砂災害と流木災害に焦点を当て、その特徴や対策法について説明する。

2. 土砂災害

土砂災害とは、豪雨や地震などが引き金となって、山腹斜面や崖が崩れたり、水と混じり合った土砂礫が下流域へと大規模に流出したりすることによって、人命や社会に大きな損失を生じさせる自然災害のことである。土砂災害は「土石流」「地すべり」「がけ崩れ」などに大別されるが、水工学分野に最も関連するのは土石流であろう。ここでは土石流災害を中心として解説する。

2. 1 土石流とは

土石流は河床や山腹の土砂礫が、降雨や急激な融雪によって供給される大量の水と混じりあって流動化し、谷地形に沿って下流域へと流出する現象をいう。土石流の先頭部には、大きな石や岩、流木などが集中することが多く、時として時速 40km に近い速度で流下することがある。土砂濃度がさほど高くない場合には鉄砲水と呼ばれることもある。土石流の代表的な発生形態としては、次の3つが挙げられる。

- 1) 溪床堆積物の流動化：溪床基岩上に堆積した土砂が豪雨によって供給された大量の水と混じりあい、流動化したもの。我が国で発生する土石流の大半を占めるもので、我が国における現在の土石流対策は基本的にこの発生形態のものを対象としている。



図-1 2018年7月の豪雨によって土石流が発生した安芸郡熊野町川角の溪流

- 2) 斜面崩壊および地すべり土塊の流動化：河道沿いの山腹斜面において大規模崩壊や地すべりによって生じた土塊がそのまま流動化したもの。1997年7月に鹿児島県出水市針原川において発生した土石流や2003年7月に熊本県水俣市水俣川水系宝川内川支流集川において発生した土石流はこの形態であったとされている。渓床起源のものに比べ大規模になることが多く、通常の対策工では防ぎきれないため、被害が大きくなることが懸念される。

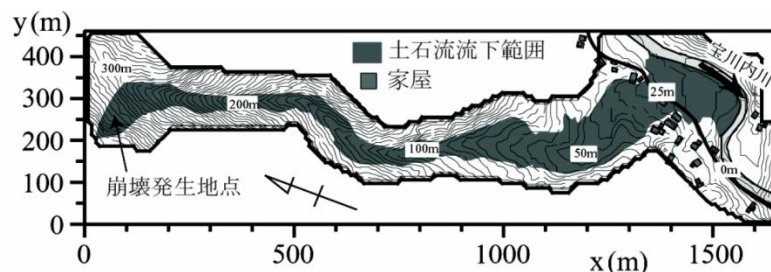


図-2 2003年に水俣川水系宝川内川支流集川において発生した土石流の流下範囲

- 3) 天然ダムの決壊：山腹斜面の崩壊等により河道が大量の土砂によって埋められたものを天然ダムという。ダムの高さが80mを超えるような場合もある。ダム決壊時にはダム上流に溜まった水が堤体の土砂と混じりあって一気に流出するため、大規模な土石流・鉄砲水を生じさせる。



図-3 宮崎県耳川流域における野々尾天然ダム決壊後の状況

上流域の急勾配の領域で発生した土石流は、谷地形に沿って流下する。非粘着性の土砂礫と水によって土石流が構成される場合、平衡状態において土砂濃度 C は、勾配 θ に強く依存することが知られている。砂の内部摩擦角を ϕ ，砂の密度を σ ，水の密度を ρ とするとき、

$$C = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \theta - \tan \phi)} \quad (1)$$

と表される。土石流の平衡濃度は勾配の単調増加関数となっていることがわかる。上記の式をはじめ、土石流の機構に関しては高橋保著「土石流の機構と対策」(近未来砂刊)に詳しく解説されているので、興味のある方は一度読んでみることをお勧めする。

流下するに伴い河床勾配が緩くなってくると、土石流に含まれる土砂の一部は河床上に堆積するようになる。谷出口の扇状地はこのような堆積の結果形成されてきたものである。扇状地上の河川は数度の勾配があり、流速が大きいこともあって、通常の出水に対しては十分な排水能力を有している。しかしながら、上流から土石流が流下してくると、河道内に急激な土砂堆積が生じ、河道断面が維持できない場合が多い。これ

2019 年度（第 55 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 19-A-8

2018 年西日本豪雨による 河川災害の概要と課題

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

2019 年 9 月

2018年西日本豪雨による河川災害の概要と課題

Characteristics of River Disasters Caused by West Japan Torrential Rain in July 2018

前野 詩朗

Shiro MAENO

1. はじめに

近年、全国各地で地球温暖化の影響と考えられる豪雨災害が頻発している。例えば、2012年7月九州北部豪雨災害、2013年7月山口・島根豪雨災害、2014年8月広島豪雨災害、2015年9月関東・東北豪雨災害、2016年8月北海道・東北豪雨災害、2017年7月九州北部豪雨災害、2018年7月西日本豪雨災害などが挙げられる。これらの水害の特徴として、3つの点が挙げられる。第1番目に何れも多く犠牲者を伴う大規模災害であったこと、次に数年という短期間で繰り返されるようになったこと、さらに東北、北海道等どちらかという水害は少ないと考えられてきた地域が被災するようになったことである。このように、全国各地のどこで豪雨災害が起きてもおかしくない状況が顕在化している状況下で、梅雨前線の停滞による2018年西日本豪雨により、主に広島県、岡山県、愛媛県で多数の犠牲者がでる大災害が発生した。

本報告では、3県で発生した洪水被害の概要を述べるとともに、岡山県で多くの犠牲者が発生した高梁川水系の被災状況を紹介するとともに、数値シミュレーションにより、氾濫過程を明らかにする。

2. 降雨と被害の概要

2.1 降雨の概要^{1),2)}

図2.1は、西日本における2018年6月28日から7月8日の期間降水量分布を示している。図より、西日本の広い範囲で500mm~1,800mmを上回る大雨であったことが分かる。アメダス観測所等(約1,300地点)における48時間降水量は125地点で観測史上最大を更新した。これらの観測地点は西日本に広く分布しており、このうち、統計期間が30年以上ある97地点で年超過確率を算出したところ、岡山県で16地点中13地点、広島県で19地点中18地点、愛媛県で10地点中9地点において再現期間が100年を上回る規模の洪水であった。本豪雨をもたらした背景要因として、気象庁は「地球温暖化に伴う水蒸気量の増加の寄与があった」として、初めて個別災害について気候変動の影響に言及した。

2.2 被害の概要^{2),3),4)}

今次豪雨により、西日本各地で同時多発的に河川の氾濫、内水氾濫、土石流等が発生し、死者行方不明224人、住家の全半壊等21,460棟、住家浸水30,439棟の甚大な被害が発生した。堤防決壊は、37箇所(国管理河川2箇所、都道府県管理河川35箇所、内岡山県10河川16箇所、広島県12河川16箇所)で堤防が決壊した。

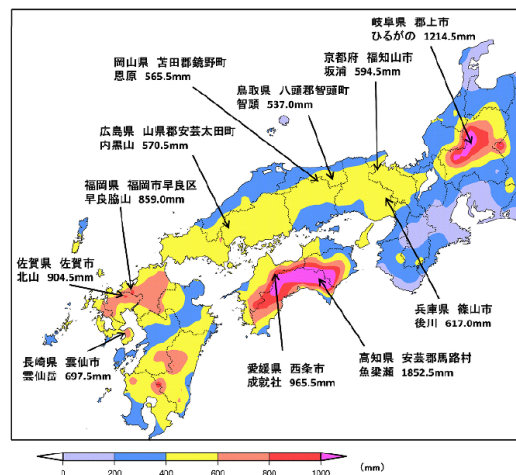


図2.1 期間降水量分布図(6月28日~7月8日)¹⁾

岡山県では、高梁川水系小田川とその3支川においてバックウォーター現象の影響を受けた水位上昇に伴う越水等により8箇所が決壊した。また、高梁川の中流域では右支川成羽川との合流点付近とその下流が軒並み浸水被害を受けた。さらに、旭川水系旭川の放水路である百間川の左支川の砂川が決壊し、2,246棟が浸水した。

広島県を流れる大屋川や総頭川などの複数の河川で、上流で発生した土砂災害の土砂が河道に流入し、河川の下流部で土砂と洪水が氾濫する土砂・洪水氾濫が発生した。また、太田川水系三篠川では橋梁の橋脚が流失した。その他にも、沼田川水系沼田川では複数箇所から越水し、複数の支川で8箇所決壊が生じ、3,824棟が浸水した。

国土交通省が所管するダムのうち、213ダムで洪水調節が実施され、8ダムでサーチャージ水位を上回ることが予測されたため異常洪水時防災操作が実施された。このうち、愛媛県の肱川では、野村ダムと鹿野川ダムで同操作が実施され、ダム直下流で数名の犠牲者が出た。また、肱川の県管理区間の下流付近の菅田地区では、無堤区間や霞堤箇所からの溢水により361棟が浸水した。さらに、右支川矢落川が合流する大洲盆地及びその下流の国管理区間ではすべての暫定堤防箇所を越流し、東大洲では二線堤からも越流し3,114棟が浸水した。

3. 倉敷市真備地区の被災状況と氾濫シナリオの検討

岡山県西部を流れる高梁川は、中国山地を源として南流する幹川流路延長111 km、流域面積2,670 km²の一級河川である。図3.1に示す河口から約13 km付近で流路延長77.9 km、流域面積は479 km²の右支川小田川と合流し、倉敷平野を南流し、水島灘に注ぐ。高梁川と小田川が合流する地点の下流は大きく湾曲していることに加えて、兩岸が山付きで狭窄部となっており、洪水時には高梁川の水位が上昇し、河床勾配が緩やかな小田川がバックウォーター現象の影響を受けて数キロに渡って水位上昇するため、過去幾度となく洪水被害を受けてきた。

平成30年7月5日～7日にかけて西日本一帯に停滞した梅雨前線豪雨により、3日間雨量は高梁川上流域で400 mmを超え、倉敷市で300 mm程度の大雨³⁾となり、小田川及びその支川の末政川、高馬川、真谷川の複数箇所ですべての堤防が決壊した。真備町では町の面積の約1/3の1,200 haの地域が最大で5 m程度浸水し、多くの方が犠牲となった。図3.1中の赤破線で示す今次洪水で浸水した地域を以下では「真備地区」と呼ぶ。本研究では、現地調査、聞き取り調査に加えて、国土交通省高梁川水系小田川堤防調査委員会資料⁵⁾、岡山県平成30年7月豪雨災害検証委員会資料³⁾等を用いて堤防の決壊状況や浸水状況等を明らかにする。また、河道の洪水流と決壊箇所からの氾濫流を同時に解く包括型氾濫解析モデルを用いて、氾濫シナリオを検討した。解析では、最初に、決壊を生じさせない条件で解析を行い、氾濫開始時刻の推定を行った。次に、決壊させた条件で解析を行い、氾濫水の挙動を明らかにするとともに、解析により得られる浸水深と現地調査結果を比較し、想定した氾濫シナリオによる浸水過程の再現性について検討した。

3.1 降雨、水位、流量の状況

3.1.1 降雨の状況^{3),4),6)}

図3.2は7月5日から7月7日までの3日間累積降雨量を示している。また、図3.3は同期間の高梁川流域の上流部の代表地点における時間降雨量と累積雨量を示している。これらの図より、累加雨量は流域の上流部の県北西部で350 mmから400 mm程度で、県南の倉敷市で300 mm程度の大雨であったことがわかる。高梁川上流に位置する新見と高梁川の右支川成羽川上流の東城では、7月5日の昼頃から降り始め、夕方にかけて時間20 mm前後の比較的強い雨が降り続き、累積雨量が100 mmから150 mm程度に達した。その後、6日



図 3.1 高梁川、小田川合流部の概要