

□ 頻発・激甚化する水災害への備え：

ハザードマップと洪水予報の現状と今後の展望

京都大学防災研究所教授

佐山敬洋

1. はじめに

全国各地で毎年のように水災害が発生し、多くの人的、経済的被害をもたらしている。近年の大規模水害を挙げれば、鬼怒川で堤防が決壊した平成27年9月関東・東北豪雨、中小河川で大規模な土砂・洪水氾濫が発生した平成29年7月九州北部豪雨、高梁川水系小田川や肱川などで氾濫して西日本を中心に232名の死者・行方不明者をもたらした平成30年7月豪雨（西日本豪雨）、千曲川や荒川上流で氾濫し関東・東北地方を中心に2兆1,800億円という統計開始以来最大の被害額となった令和元年東日本台風、さらには熊本県人吉市に84名の死者をもたらした令和2年7月豪雨など、枚挙にいとまがない。

最近の研究成果によれば、気候変動の影響は既に顕在化しており、例えば1980年以降の温暖化が令和元年東日本台風を強化し、千曲川の氾濫発生リスクを高めたことが分かっている^[1]。温室効果ガスの排出を軽減する気候変動の緩和策は世界各地で取り組まれているが、いかに排出抑制をしても2050年頃までには産業革命以降1.5～2度程度の気温上昇を避けることは困難であり、それに伴う豪雨の頻発・激甚化は避けられない状況である。

頻発・激甚化する豪雨に備えるためには、河川整備や遊水地の整備などのいわゆるハード対策

と、避難・保険・住まい方の工夫などに代表されるようなソフト対策の両者が大切である。最近では、気候変動の影響を踏まえた治水計画の見直しと、それに伴うハード対策の強化が進みつつある。他方、それだけでは不十分であり、市民、行政、民間企業などが協働して流域全体で取り組む治水、いわゆる流域治水を進めることも重要となる。本報では流域治水の中でもソフト対策に焦点を当て、個人レベルで取り組むことができる備えについて、現状と今後の方向性を展望する。

我が国の治水に対するソフト対策を議論するうえで、いわゆる災害のサイクルを基軸にすると分かりやすい。災害のサイクルは、災害の発生前・発生中・発生後にフェーズを分類する。事前に行える対策として代表的なものは、ハザードマップを確認する、タイムラインを用意する、水害保険に加入する、止水版を用意しておくなどがある。災害発生直前や時中の対策としては、気象防災情報入手する、安全に避難するなどがある。自治体やコミュニティのレベルでは、水防団の活動を開始したり、避難所を開設したりといった対策を講じる。災害発生後のフェーズは、さらに復旧、復興の段階に分類され、特に大きな水害を受けた被災地では、どのように同じ災害を繰り返さない地域づくりを進めるかが大きな課題となる。このように様々なソフト対策があるが、本報では、もっ

とも身近な対策として、ハザードマップと洪水予警報を取り上げて解説する。両者の基本的な事項は自治体のホームページなどでも確認できるので、ここでは、それらがどのような技術的背景をもって構築されているかを中心に説明する。

2. ハザードマップの現状と技術的背景

日本の主要な河川は、国土交通省もしくは都道府県によって管理されている。国土交通省は一級水系の直轄区間を管理している。都道府県は一級水系の指定区間および二級河川を管理している。それ以外にも、市町村が管理する準用河川や河川法が適用されない普通河川が多数存在する。国交省や都道府県が管理する河川については、想定最大規模とって、生じ得る最大級の豪雨（1000年に1回程度の確率に相当）が発生した場合に、河川を流れる水量（流量）がどの程度に達し、洪水の水位がどの程度まで上昇し、さらに堤防が決壊、越水した場合にどのように浸水が生ずるかを数値シミュレーションで計算する。平成27年の水防法改正に伴い、シミュレーションの空間解像度は25 mと、それ以前に比べて詳細な計算が実施されるようになった。ただし、実際の河川は延長が長く、想定最大規模の豪雨に対して、どこで決壊や越水が生じるのかを事前に想定することは難しい。そのため、100～200 m程度の間隔で氾濫想定地点を設けて、そこから洪水流が溢れることを想定して、多数の浸水シミュレーションを実施する。その結果、同じ地点においても、複数の想定地点からの氾濫で浸水する計算結果が得られる場合があるが、最も大きい値を選択することで、全ての地点において最大の浸水深を包絡する。このようにして作成された情報は浸水想定区域図と呼ばれ、ハザードマップの背景図となる。上記の方法に従うと、例えば利根川や淀川のような大河川における浸水想定区域図は、多数の市街地を含む広域の浸水エリアを示す。しかし、実際には全想定地点

から同時に氾濫することは無いので、一回の洪水で発生する浸水の状況は浸水想定区域図よりも小さくなることに注意する。また、市町村によっては国と都道府県が管理する河川が共存していることもある。さらに両者が接続していたり、隣接していたりする場合には相互に影響し、同時に氾濫する可能性もある。国管理と都道府県管理の浸水想定区域図は別に作成されることが多いため、市町村が各戸に配布するハザードマップは、どの河川の浸水想定区域図を基礎にするかを選択している。洪水ハザードマップには、どの浸水想定区域図を基礎にしているかという記載があるので、関心のある読者は一度確認いただきたい。また、河川は氾濫せずとも雨水のみで浸水が生ずる場合を内水氾濫とよび、内水ハザードマップが整備されている地域もある。なお、国土交通省はハザードマップのポータルサイトを公開するとともに、その背景となる浸水想定区域図も浸水ナビというウェブサイトで確認できる。

3. 洪水予報の現状と技術的背景

安全な避難を実現するうえで、洪水予警報の情報はハザードマップと両輪の関係にある。ハザードマップで、どの河川が溢れた場合に、どのような浸水が発生するかを事前に想定し、豪雨の発生時には、河川の水位がどのような状態にあるのかをリアルタイムで把握するとともに、数時間先まで予測する。市町村は、河川管理者による洪水予報の情報に基づいて避難指示等を発令する。ハザードマップと同様に、河川情報は河川管理者が、具体的な避難情報は市町村が発令するという二段階の仕組みになっている。なお、河川管理者による水位の予報は、基本的には水位が観測されている地点に限られるため、全ての河川をカバーしている訳ではないことに注意が必要である。上流域の面積が大きい河川では、雨量の予測情報に基づいて、比較的精度よく水位を予測できる。そ

のため3～6時間先までの水位を予報する。このような洪水予報は指定河川洪水予報と呼ばれる。一方、流域面積が比較的小さい河川は水位の予測が難しいため、水位の観測情報に基づいて避難指示等が発令される。このような河川は水位周知河川と呼ばれる。これまでの洪水予報の多くは、流域や河川の貯留と流出を概念的にタンクのように見立てて解析する貯留関数法といった手法が広く用いられてきた。一方、近年では、河川の水位や流量を物理的に解析するモデルとして、地形、河川の位置、土地利用などの空間分布を反映できる分布型流出モデルの洪水予報への応用も進んでいる。いずれにしても、実際に観測された雨量と気象モデルによる予測雨量をこうしたモデルに入力することによって、数時間先までの水位を予測するというのが指定河川洪水予報の基礎となっている。水防などでも活躍されている本報の読者の方には、ぜひ地元の河川が、指定河川洪水予報の対象河川か、もしくは水位周知河川か、あるいはそのいずれにも該当しない河川かを確認いただき、さらに、それらの予報がどの地点の観測水位に基づいたものであるかを知っていただくとよい。豪雨の際に、それらの地点の水位変化や予測情報にアクセスすると、洪水予報の実態がよく理解いただけると思う。なお、河川水位の情報は『川の防災情報』というウェブサイトを確認することができる。

4. ハザードマップの課題と今後の展望

上述の通り、我が国のハザードマップとその基礎となる浸水想定区域図は精緻なシミュレーションに基づくものであり、対象とする河川も中小河川まで拡大している。現状のハザードマップは、想定最大規模の豪雨に伴う最悪の事態を把握しておくために有効な情報となる。一方で、様々な治水対策を検討する流域治水の実現のためには、10年から20年に1度発生するような、比較的高頻度の洪水に対して、どのような浸水が発生するのか

を把握することも大切となる。いわゆる水害リスクの高いエリアにおいて、どのような住まい方を考えるべきか、仮に水害が発生した場合に同じ場所に復旧・復興することが賢明な選択か、さらには工場、事業所、避難所等の立地に適する場所かなどを検討するうえでは、前章で述べた手順を得て作成されるハザードマップは情報が不足する。様々な確率規模に対する浸水深の情報は、水害リスクマップや多段階の浸水想定図と呼ばれ、直轄区間については国土交通省が近年新しい情報を公開しており、水害リスクマップで検索すると国交省のウェブサイトを確認することができる。こうした情報の充実化は今後さらに進むものと期待される。

ただし、現状、水害リスクマップは直轄区間に限られており、より高頻度で発生する河川は、都道府県管理の河川が多い。滋賀県による地先の安全度マップや、それに基づく流域治水の先進的な取り組みもあるが、そうした事例は限られている。さらに、これまで100年に1回発生すると考えられてきた規模の洪水が、温暖化の影響で、例えば30年に1回や10年に1回程度に頻発化することが最近の気候変動の影響評価研究で明らかになっている。それらの研究成果がハザードマップや水害リスクマップに反映されるまでにはもう少し時間がかかるが、今後、住まい方や土地利用を検討するうえでも、気候変動がどのように私たちの生活に影響を及ぼすようになるかを考慮に入れることは大切であり、そのための基礎的な情報を提供できるような研究も進みつつある。

以下では、著者らの研究を一例として紹介する。私たちのグループでは、日本全国の河川を対象とした洪水予測のシミュレーションモデルを構築している。基礎となるモデルは、降雨流出氾濫(Rainfall-Runoff-Inundation: RRI)モデルと呼ばれるものであり、著者が土木研究所 ICHARM に所属した頃から開発を進めてきたモデルである。このモデルは、地形や土地利用などの情報をメッ

シミュレーション情報として準備し、降雨の時空間分布を入力することで、河川の流量や水位、氾濫に伴う浸水深を広域で解析するモデルである。川の断面情報を反映したり、過去に観測された流量データを用いてモデルの定数を調整したりすることで、その精度が向上する。全国版のRRIモデルは、150 mの空間解像度で全国を14の地域に区分して構築している。RRIモデルは、空間的に分布した情報を直接取り扱うので、分布型モデルに分類され、流域の内部の河川でも水位や流量を推定することができる。全国版RRIモデルでは、中小河川を含めて、すべての河川で水位や流量を出力し、また150 mという解像度に限定されるが、全国のあらゆる場所で浸水深を推定することができる。次節に示すように、このモデルをリアルタイムで駆動し、レーダなどで観測された雨量や予測雨量を入力すれば、リアルタイムの洪水予報モデルとなる。一方、水害リスクマップの基礎となるような情報を構築するためには、以下の二つの考え方がある。一つは、浸水想定区域図を作成するように100年や想定最大規模の雨を入力する方法。もう一つは、長期間の降雨データを入力して河川流量・水位などをモデルで計算し、それが何年に1回に相当するかを確率評価する方法である。前者は、計

算コストが小さいが、全国の全ての地点を対象にした場合、100年や想定最大規模の雨とは何か？という根本的な問題に直面する。一方、後者を実現するためには、長期間で様々な豪雨を含めた降雨データを入力する必要がある。実際に観測された降雨データでは、観測期間が短いため、統計処理に足るような計算期間をとることができないという課題があった。それに対して、近年は、気候変動の影響を評価するために、領域気候モデルの開発が進み、さらに全国や全球をカバーするようなデータセットが充実してきた。例えば、気象庁気象研究所は、全国を5 kmの空間解像度でカバーし、60年分×12通り（全720年分）の降雨データを整備している（d4PDF-5kmと呼ばれる）^[2]。さらに、温暖化の影響を加味したパターンとして、2度上昇、4度上昇を想定した結果も準備されている。領域気候モデルによる出力は、実際に発生した降雨の分布とは異なるが、現在の気候を想定した場合の現実的な降雨分布として治水の計画や水害リスクの評価に応用できることがわかってきている。これらのデータを全国版RRIモデルに入力して、各地域で3000～5000程度の豪雨を入力すれば、それに対応する流量や水位が出力される。その結果を統計的に処理すること

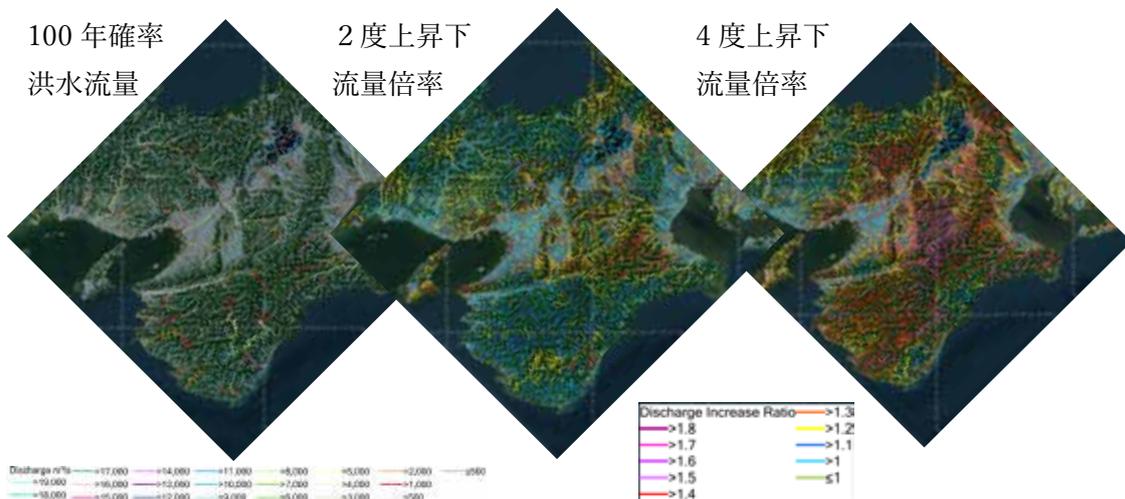


図1: 全国を対象とした確率流量評価と温暖化の影響評価（図は近畿地方を中心に再現期間100年相当の洪水流量（左）と温暖化時の変化倍率（中：2度上昇想定、右：4度上昇想定）を表示）

で、例えば、10年、20年、50年、100年に1回といった流量と水位を全ての河川で求めることができる(図1)^{[3],[4]}。ちなみに、浸水深も同じように求められるが、その精度は現在検証中である。このようにして求められた河川の流量データを入力条件として、ローカルな浸水シミュレーションを実施すれば、ここで課題に挙げた、様々な確率に対する地先の浸水深分布を現在気候下、2度、4度上昇下で推定できる。このようにして、気候変動の影響を考慮に入れた新たな水害リスクマップを作成できるようになると考えている。

5. 洪水予報の課題と今後の展望

気象学・水文学・水工学を基礎にした研究の進展に伴って、リアルタイムの洪水予報も近年各段に進化している。気象レーダの整備や技術革新によって豪雨時の雨量の推定精度が向上してきた。また、詳細な地形情報や雲の物理的な過程を反映する気象モデルの進展により、短時間の豪雨の予測精度が従来に比べて格段に向上している。さらに、洪水を予測するモデルも、従来は流域単位で構成され、水位や流量の観測情報がある地点だけを対象にしていたものが、山地や平野部での雨水

の流動過程を物理的に計算する技術が進展し、観測情報が存在しない河川、とくに中小河川においても精度よく洪水を予測できるモデルの開発が進んできた。これらの先端技術を組み合わせることによって、従来は観測情報の存在する地点のみが洪水予測の対象であったのに対し、中小河川も含めて領域内全体で河川の水位や流量を予測する技術の開発が進む。筆者の知る範囲ではあるが、例えば兵庫県や京都府などでは、府県内の全ての河川を対象に、上記のRRIモデルを用いて6時間先までの水位変化を予測し、関係基礎自治体などに情報提供する新たな水位予測システムの開発が進んでいる。そうした中小河川では、豪雨時には河川が氾濫し、周辺道路などが浸水する可能性も高く、災害対応や避難にも影響する。そのため、河川の水位のみならず、浸水の状況をリアルタイムで予測する技術開発も進む。さらに、上述の全国版RRIモデルに、気象庁によって提供されている長時間の気象予測情報を入力することによって、例えば24時間先に河川の流量がどのような状況になるのかを予測するような研究も進展している。気象庁による長時間の予測情報は、メソアンサンブル予報システム(MEPS)と呼ばれ、一日4回39時間先まで、5 kmの空間解像度で雨量予測情報

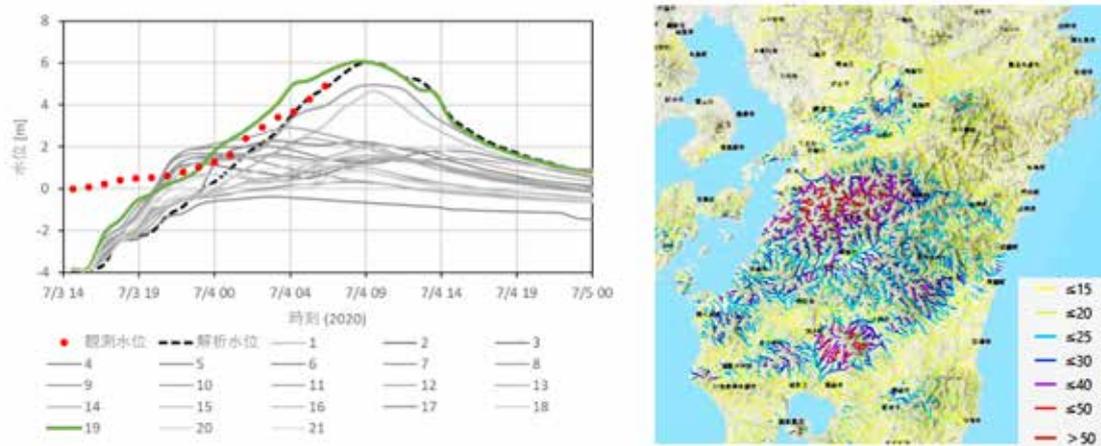


図2: 令和2年7月豪雨を対象とした球磨川流域人吉地点における39時間先アンサンブル洪水予報の結果(左図)。右図は、No. 19の雨量予測メンバーによる九州地方の予想最大流出高(赤い部分が単位面積当たりの流量が多いことを示す)。

を提供している。ただし、長時間の雨量を正確に予測することは難しいため、台風の予報円と同様に、複数の可能性（MEPS の場合は21通り）を提示する。台風の襲来や豪雨の発生前にこれらの情報を用いて洪水を予測し、さらにタイムラインと結びつけることで、例えば計画運休や車両の退避など、時間をかけて事前にできる対策を講じることができるようになる（図2）^[5]。

6. おわりに

本報では、ハザードマップと洪水予報について、既存の情報がどのような過程で作成されているかを解説した。また、最近の科学技術の進展に伴って、両者の情報がどのように進化を遂げているかを紹介し、その展望を概観した。頻発・激甚化する水害に対して、今後私たちはどのように備え、いかに安全な行動を取ることができるかが肝心であり、科学技術が進展し、新たな情報ができれば解決するという問題ではない。ただし、雨の降り方が変わり、土地利用も変化するなかで、実際にどのような洪水が発生し得るのか、その影響がどこまで及ぶのかを経験的に予期することはますます困難になっている。本報で紹介した様々な情報

が、自然の猛威を少しでも具体的にイメージするために寄与することを期待する。

【参考文献】

- [1] Yasuo Nihei, Koyo Oota, Hiroaki Kawase, Takahiro Sayama, Eiichi Nakakita, Takehiko Ito, Jin Kashiwada: Assessment of climate change impacts on river flooding due to Typhoon Hagibis in 2019 using nonglobal warming experiments, *Journal of Flood Risk Management*, Vol. e12919, doi:<https://doi.org/10.1111/jfr3.12919>, 2023.
- [2] Kawase, H., Nosaka, M., Watanabe, S. I., Yamamoto, K., Shimura, T., Naka, Y., et al.: Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2023JD038513, 2023.
- [3] 佐山敬洋：民間企業による適切な浸水リスク評価に向けた今後の展望，*河川*，Vol. 922, No. 5, pp. 24-28, 2023.
- [4] Chen, J., Sayama, T., Yamada, M., Sugawara, Y.: Regional event-based flood quantile estimation method for large climate projection ensembles, *Prog Earth Planet Sci* 11, 16, <https://doi.org/10.1186/s40645-024-00618-x>, 2024.
- [5] 立川康人・中安正晃・佐山敬洋：アンサンブル予測を活用した長時間／広域洪水予測と社会実装，*河川*，Vol. 77, No. 1, pp. 86-92, 2021.