

洪水災害に対する気候変動の影響と適応

佐山敬洋（京都大学 防災研究所）

1. はじめに

2015 年関東・東北豪雨、2017 年九州北部豪雨、2018 年西日本豪雨、2019 年東日本台風、2020 年球磨川豪雨と、この数年、毎年のように甚大な豪雨災害が発生している。気候変動の影響が顕在化し、今後ますますひどくなるという認識は、報道でも耳にする機会が多くなったし、徐々に一般的な感覚としても広がってきたように感じる。

豪雨災害の中でも、本講義では、主として河川の洪水災害(外水氾濫)に焦点を当てる。そのうえで、上の一般的な認識が決定的外れではないこと、より深刻に捉えて対策を講じるべきであること、河川管理の実務でも気候変動の影響評価や適応策の検討が進んでいること、さらに、その検討方法には、種々の科学的な課題があり、多くの研究者がこれらの課題に取り組んでいることなどをお伝えしたい。

2. 防災気象情報と気候変動影響評価

本講義の受講者の皆さんは、気象に関心を持つ専門家や学生がほとんどであろう。言うまでもなく、極端気象と洪水災害は密接に関連している。私が専門とする洪水予測は、リアルタイムの予測であれ、河川計画に用いる計画予知であれ、気象情報から洪水に関連する防災気象情報への翻訳と換言できる。ただし、その翻訳のためには流域に降った雨がどのように河川に流出するか、河川のネットワークで洪水がどう下流に伝搬し、川の水位がどう変化するか、いつ・どこで堤防が決壊し、どのように被害が発生するかという要素が肝心である。ここに水文学（すいもんがく）、水工学、防災工学などの専門領域が関る。

この講義の中では、なるべく平易な言葉で説明をしたいと思うが、上の文章だけでも、すでに聞きなじみのない用語がいくつかあると思う。表 1 に簡単に用語の整理を示しておく。

気候変動の予測を含めて、気象の情報から洪水災害の防災情報に翻訳するうえで大切な役割を果たすのが、数値シミュレーションモデルである。

表 1: 洪水災害に関連する基本的用語

流出	流域に降った雨水が河川に流入する現象
洪水	河川の流量や水位が普段よりも増大している現象
決壊・破堤	越水などで堤防が破壊される現象
(外水) 氾濫	河川の水があふれ広がる現象
(内水) 氾濫	雨水が直接あふれ広がる現象
浸水	氾濫水によって市街地や田畑が水に浸かる現象

気象・気候モデル同様、洪水災害の分野でも目的に応じて複数の数値シミュレーションモデルを活用する。これらを大別すると、雨から河川流量を水文学の知見をベースに予測する降雨流出モデル、上流から下流まで洪水波の伝搬を追跡して水位変化を予測する河川流下モデル、堤防が決壊した場所から市街地などに広がる浸水の深さとエリアを予測する洪水氾濫モデルに分けられる。これに加えて、雨量を定量的に予測する数値気象予報モデルが洪水災害に関する 4 種のモデルである (図 1)。さらに、いわゆる洪水の物理的なモデルとは異なるが、浸水時間と浸水深などから人的・経済的被害を予測する被害推定モデルも存在する。

河川管理者が実施する洪水予測では、主要な河川を対象に、主として降雨流出モデルを用いて対象地点の流量の変化をリアルタイムで予測し水位変化に換算する。最近では、河川流下モデルも組み合わせ、河川沿いに水位の変化を予測する水害リスクラインと呼ばれる新たな洪水予測も進められている。一方、被害に直結する浸水については、堤防の決壊場所と時刻をリアルタイムで予測することが困難であり、かつ計算時間も要するため、どこで堤防が決壊すれば、どこが浸水するかということを事前に洪水氾濫モデルで予測しておいて、その結果を住民に周知する手段が取られる。これが洪水ハザードマップである。

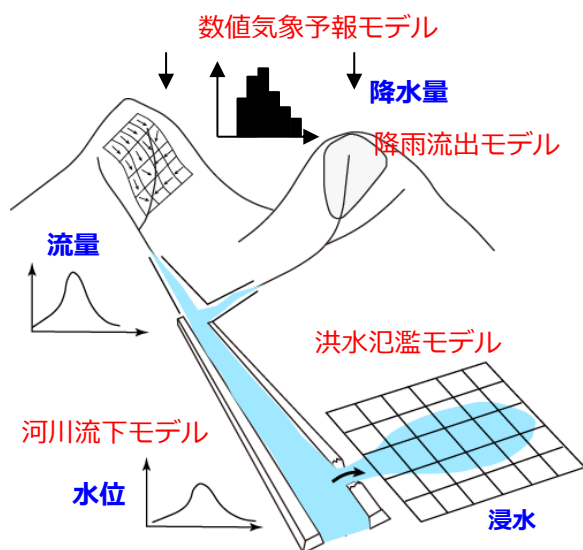


図1 洪水災害に関する4種のモデル

洪水災害に関する気候変動の影響評価でも、用いる入力情報がリアルタイムのものではなく、将来の気候を反映した降雨の時空間分布であることを除いて、使用するモデルや手法は凡そ同じである。ただし、適応策を考えるうえでは、豪雨から被害まで、将来の人口・土地利用や、インフラ整備の状況まで加味して翻訳する必要がある。そのため、気候変動の予測同様に様々な仮定をシナリオにして推定せざるを得ない。特に、経験したことの内容な豪雨に対して広域かつ緻密に被害まで推定することは非常に困難であり、基礎的なモデルの高度化が必須となる。また、後述するように、気候変動の予測情報も、多アンサンブル、高解像度、長期連続解析と順次アップグレードされる中で、どの情報をどのように活用して気候変動の影響評価を行うべきか、という方法論の確立が当該分野の大切な研究課題である。

3. 気候変動の影響を考慮した治水計画の見直し

気候変動の影響が顕在化する中で、この数年の間に、治水の考え方と治水の計画に大きな変革がもたらされた。一つは報道などでも紹介されている「流域治水」であり、もう一つは気候変動の影響を考慮した治水計画の見直しである。2018年に制定された気候変動適応法では、防災分野を含めて国、地方公共団体、事業者、国民が連携・協力して適応策を推進するための法的仕組みを定めており、河川管理者

たる国土交通省の気候変動適応策として、この二つの取り組みは相互に関連する大切なものである。

流域治水について、本講義で詳細に触れることは省略するが、その根本的な考え方は、これまで河川の中で処理することを中心に展開してきた治水を、流域全体で捉えて、陸地から河川に流出するのを抑制したり、氾濫した水を流域で一時的に受け止めて下流の被害を防いだりと、より流域全体で治水を考えることに特徴がある。流域全体で治水に取り組むうえで、様々なステークホルダーの参画が不可欠となる。そのため、流域治水の翻訳には“by all”という用語が入るほど、あらゆる関係者の協働が強調されている。概念的には、IPCCの第5次評価報告書などでも示された、災害の外力(hazard)、暴露(exposure)、脆弱性(vulnerability)の組み合わせによって災害リスク(risk)が決まり、災害リスクを軽減するためには、外力のコントロールのみならず、それ以外の要素の管理も大切であるという災害リスクマネジメントの原則に則った考え方である。

この流域治水と同様に重要な治水の変革が、基本高水と呼ばれる河川の計画目標への気候変動影響の考慮である。河川の整備を進めるうえで、例えば100年に1回の頻度で発生するような規模の洪水はどの程度のピーク流量に達するかを推定する。我が国では、戦後に都市化が進んで流出形態や河川の状況も変化してきたため、観測されたピーク流量を統計処理するのではなく、観測された降雨をもとに外力を決定し、この時空間分布を上述の降雨流出モデルに入力して、河川のピーク流量を推定する。100年に1回程度の推定流量を、河川の治水計画に用いる基本高水とする。基本高水は長期的な河川の整備目標であって、この流量を安全に流せるようにダムや堤防などの治水整備を進める。

このように基本高水を求めるこれまでの方法は、観測された降雨を確率統計的に処理するものであるため、確率主義に基づく治水計画と呼ばれてきた。一般的な極値統計は、豪雨の発生頻度や強度の定常性を仮定している。一方で、気候変動によって、その定常性の仮定が成り立たなくなり、それを治水計画に考慮することの重要性が認識されるようになった。もちろん極値統計の理論で非定常を考慮するという方法もあるものの、結局は、将来の豪雨がどのように変化するかを定量的に推定することが大切である。文科省・気候変動リスク情報創生プログラム

が主導して、気象研究所などが中心となって作成した「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)」の予測情報を反映した治水計画に向けて国土交通省は大きく舵を切った。

治水計画の基礎となる降水分布の推定に、気候変動予測情報を用いることがいかに困難なことであるかを想像していただきたい。全球の平均気温の変化を予測するにも困難と不確実性が伴うのに、予測がさらに難しい変数である降水を対象に、さらに短期的な豪雨を対象とし、加えて、それが全球・全日本ではなく特定の河川流域スケールで推定せねばならない。気候変動予測の潮流は、世界の多数の機関による GCM の出力結果の平均的な傾向と分散の情報を用いることであるが、例えば 100 km 程度の空間分解能で、台風や豪雨を表現し得ないモデルを多数持ち寄っても治水計画には直接役立たない。洪水災害の適応策を検討するうえで、我が国独自の予測情報やダウンスケーリングが必要となる。

d4PDF の詳細はここでは省略するが、過去実験に加えて、4 度上昇について、2051 年から 2111 年までの 60 年間について、90 メンバーの予測情報があるため、計 5400 年分の大量データとなる。それでも表現し切れない豪雨や数値モデルの限界はあるものの、そうした最新の予測結果を積極的に活用して治水計画に気候変動の影響を加味することに意義がある。

従来の治水計画では、観測された豪雨を統計的に処理して、例えば 100 年に 1 度の流域平均雨量がどの程度になるかを推定して、それに見合うように観測された降雨の空間分布を引き延ばして外力を推定した。それに対して、5400 年分の雨量分布が予測されている d4PDF を用いれば、仮にそのすべてを用いて流出計算してピーク流量を求められれば、流量データの統計処理によって 100 年に 1 回の洪水流量を推定することも可能である。

d4PDF のような大規模アンサンブル予測情報を活用することで、これまで経験したことのない様々な降雨パターンを加味することができるようになる。また、いわゆる統計的な外挿の不安定性を回避し、内挿の問題(5400 年のデータから 100 年に 1 度の洪水を推定する)に切り替えられる可能性を含んでいる。気候変動の予測情報の高度化は洪水の影響評価にとっても非常に重要な意味を持つ。

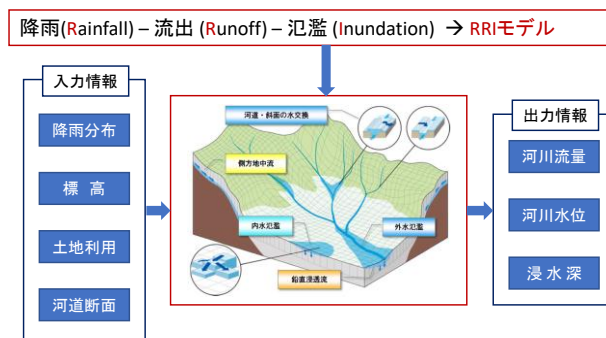
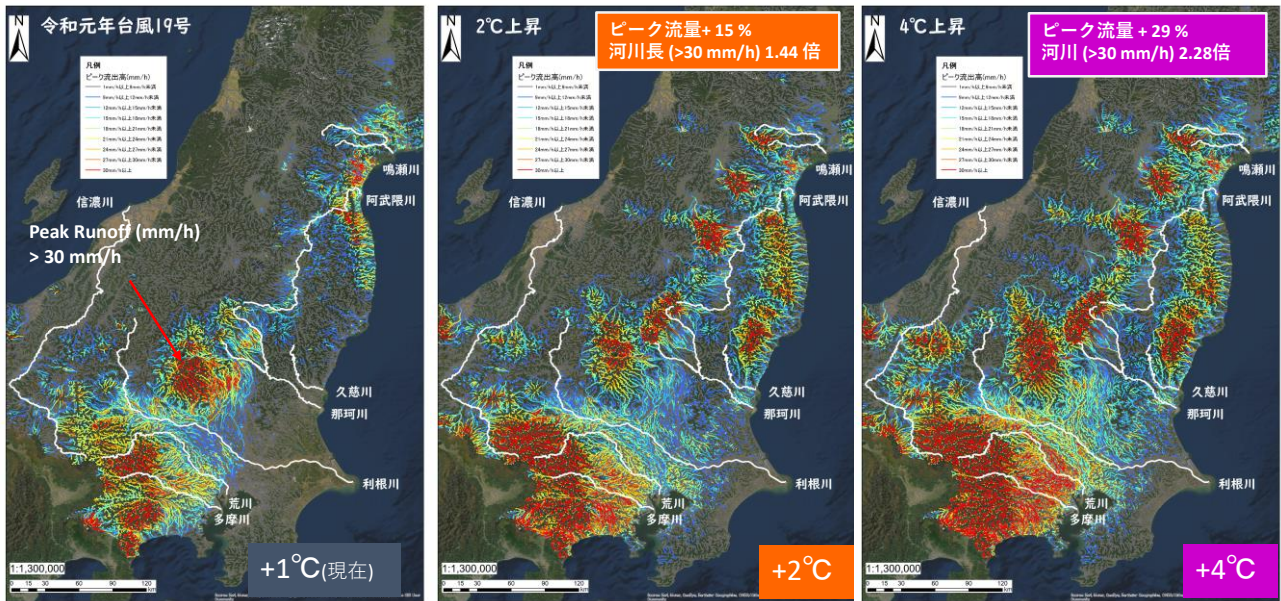


図 2 降雨流出氾濫モデル(RRI)の構成

4. 全国の河川を対象にしたハザードモデルの開発事例

洪水の影響評価が求められるのは、決して河川管理者による治水計画に限らない。基礎自治体レベルでは水害リスクが街づくりにも影響するであろうし、全国各地に工場をもつ事業者なども水害リスクの変化に関心を持つ。もちろん個人レベルで考えても、自分の住む場所や職場などが、気候変動の影響で将来どのように水害リスクが変化するかは大切な情報となる。ここでキーワードとなるのは、『地先の水害リスク』であり、気候変動に伴うそのリスクの将来変化である。地先の水害リスクを定量化するという事は、一般的に、ある再現確率に対して、浸水深さを推定することである。これは地先の浸水リスクカーブであり、それをマップ化すれば、浸水リスクマップとなる(欧州などでは、資産などを勘案した被害を推定したマップをリスクマップと呼ぶこともあるが、ここでは我が国の実情も踏まえて上記のように呼ぶことにする)。

ところで、これを求めるためには、①で述べた各種の洪水モデルのうち、降雨流出、河川流下、浸水モデルまでをすべて駆動する必要があることに留意されたい。その点が、上記の洪水流量までを求める治水計画の影響評価と異なる点である。加えて、これは、対象とする地点が地先になるため、特定の河川の地点を対象にした治水計画に比べても要求される技術的レベルが格段にあがる。この科学的なチャレンジに有効なモデルとなることを期待して講演者らが開発を進めているのが、全国版 RRI モデル(図 2)というものである。



(環境省：勢力を増す台風、2021 報告書より抜粋)

図 3：令和元年東日本台風擬似温暖化実験：流量変化

これは、空間解像度 150 m で、日本全国を覆い、降雨流出から洪水氾濫による浸水までを一體的に解析するモデルである(図 3)。確率的な破堤のモデル化など、まだまだ克服すべき課題は多いものの、降雨を入力すれば、中小河川を含めて、河川流量・水位・浸水までを広域で一體的に予測できることが特徴である。実は、②で述べた洪水流出についても、特に大規模な洪水を推定する際には、上流域で発生する氾濫に伴う影響を無視することはできないので、そうした検討にも流出・氾濫の一体モデルの活用が期待されている。また、リアルタイムの洪水予測においても、将来的には浸水のリアルタイム予測まで到達することが望まれており、一部の自治体(兵庫県や京都府)などで府県全体を対象にした新しい洪水予測の展開が始まっている。

5. 擬似温暖化実験への応用と研究の動向

開発中の全国版 RRI モデルを用いた気候変動影響評価の一例としては、気象研の川瀬ら(Kawase et al., 2021)によって推定された 2019 年東日本台風(いわゆる台風 19 号)の擬似温暖化、非温暖化実験の活用がある。その擬似温暖化実験の結果は、台風 19 号の再現解析と 2 度上昇、4 度上昇、さらには 1980 年代以降の温暖化の影響を除いた非温暖化実験の結果を提供するので、全国版 RRI モデルに直接入力す

千曲川(立ヶ花)：ピーク流量(m³/s)

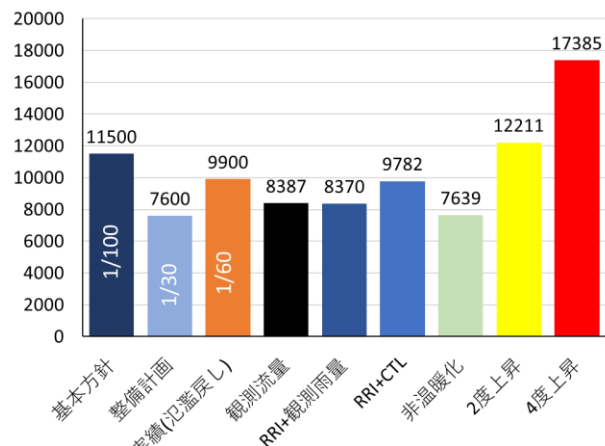


図 4：令和元年東日本台風の非温暖化・擬似温暖化：千曲川(立ヶ花地点)のピーク流量変化

れば、降雨の変化を河川流量の変化に翻訳することができる(図 3, 環境省: 2021)。

図 4 は立ヶ花という千曲川の基準点で洪水ピーク流量を表した結果である。図示は省略しているが、CTL は実績の流域平均雨量と非常によく合致することを確認している。これは河川の整備基本方針をやや上回る降水量である。これと、非温暖化の雨量と比較すると、1.1 倍程度増加していた。一方、図 4 に示した、立ヶ花のピーク流量について、非温暖化実

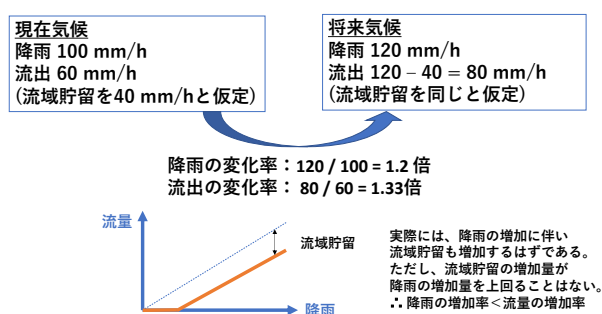


図 5：降雨の変化倍率 < 流出の変化倍率の概念的説明

験の結果に着目すると、流量が 7,639 m³/s となっており、整備計画目標レベルまで低減する。すなわち、1980 年代以降の温暖化で、東日本台風による立ヶ花のピーク流量は、約 1.3 倍増加していることを示唆する結果である。

4. で述べたように、この結果をリスク評価に結び付けるためには河川の流量ではなく浸水（あるいはそれに基づく洪水被害）にさらに翻訳することが求められる。そのためには、モデル上での水位の表現や堤防高の反映など、モデルの精緻化が求められ、その技術開発に現在取り組んでいるところである。

このように、降雨→流量→水位→浸水→被害と、気象情報から防災情報にカスケードするなかで、温暖化に伴う変化倍率（いわゆる感度）が増加してくる。例えば、先に述べた温暖化を加味した治水計画のための分析では、国交省は降雨量が 1.3 倍に対して、流量は 1.4 倍になることを示している。この理由は降雨と流量との関係が非線形であるから、ということに尽きないのだが、これを簡単に解釈するために、図 5 を用いて説明する。降雨の一部は流域に貯留されると考えれば、図 5 に示すように流量の倍率の方が降雨の倍率よりも大きくなることは明白である。同様のことが、水位と浸水、浸水と被害の関係などにも生ずるため、変化倍率はどんどん大きくなる。これは、温暖化に伴う降雨の小さな変化が、大きな被害の変化に結び付くことを意味する。

6. 大量アンサンブル予測情報の活用に向けて：今後の展望

気候変動のデータも日進月歩であり、洪水のモデルも高度化するなかで、長時間・大量のアンサンブル気候変動予測情報をいかに活用するかという課題

について、今後さらなる検討が必要である。特に、目標も地先の洪水リスク変化となると、与えられた情報やモデルをすべて使って処理をするという作業が利かない領域となる。どのように適当にイベントを抽出し、どのように結果を統計処理することによって、効率的に多地点の浸水リスクを推定するかという課題に直面している。

その解決策の糸口として、降雨ベースから流量ベースの考え方の転換が候補になる（紙面の都合により、詳細は講演中に述べる）。これは長期アンサンブルデータから成因別（台風、梅雨など）に被害をもたらす可能性のある豪雨イベントを全抽出して、選定された豪雨イベントで全ての河川を反映した降雨流出氾濫解析を行うことによって、全国の河川のあらゆる地点で超過確率に応じた洪水ピーク流量を求めることを提案したものである。全国版 RRI モデルで詳細な地先のリスクまでを推定することは不可能であるが、もし、大規模な氾濫の影響を加味したうえで、あらゆる河川のピーク流量（と気候変動に伴うその将来変化）を推定することができるようになれば、必要に応じて、現在のハザードマップ作成と同様の手法で詳細な浸水を求めることができる。文科省の先端プログラム・領域課題 4 「ハザード統合予測モデルの開発」では、ハザードモデルの高度化とともに、こうした手法の開発と実践に取り組んでいる。

参考文献

- Sayama, T., Yamada, M., Sugawara, Y. and Yamazaki, D.: Ensemble flash flood predictions using a high-resolution nationwide distributed rainfall-runoff model: case study of the heavy rain event of July 2018 and Typhoon Hagibis in 2019. Prog Earth Planet Sci 7, 75, 2020.
- Kawase, H. et al.: Enhancement of extremely heavy precipitation induced by Typhoon Hagibis (2019) due to historical warming, SOLA, 17-002, 2021.
- 環境省：気候変動による災害激甚化に関する影響評価（中間報告），2021.