

# 水災害対策と洪水予測技術

立川 康人

京都大学

洪水災害, ハード対策, ソフト対策, 洪水予測, 気候変動

## 1. はじめに

水災害を防止・軽減するための対策は、河川堤防や遊水地、ダム貯水池などの治水施設を設置したり強化したりして洪水災害を防止・軽減するハード対策と、住民の避難行動や水防団による防災活動、河川管理者によるダム操作などにより防災・減災を図るソフト対策に大別される。降雨情報や洪水予警報などの防災情報のリアルタイム発信や、浸水ハザードマップの作成など防災情報の充実もソフト対策の一環である。これらのハード対策、ソフト対策を効果的に実施するためには洪水予測が欠かせない。

予測とは将来の出来事を前もって推し量ることであり、洪水予測とは洪水が起きる前にその大きさやそれがいつ起きるかを推定することを意味する。洪水予測は対策やその目的により三種類に分かれる。一つは洪水の発生頻度に対応する洪水の強度を予測することである。治水施設を整備するとき、ある発生頻度に対応する洪水の大きさを予測して、その規模を整備目標として治水事業が進められる。そのためには、たとえば平均的に100年あるいは200年に一回発生する洪水の規模を精度よく予測する必要がある。二つめの予測は、治水施設を整備水準を超えるような極めて稀な大洪水、いわゆる物理的に考えられる最大クラスの洪水規模を予測することである。治水施設を整備水準を超えるような大洪水による被害を最小限に抑えるためには、それによる浸水発生を想定した後、避難経路や避難場所が確保され、生命が守られるようなまちづくりが必要となる。最大クラスの洪水予測は、水害に強い地域づくりの基礎となる情報を与える。三つめの予測は、天気予報と同様に豪雨や洪水が進行している最中に、数時間・数日先の洪水の大きさを時々刻々と予測することである。実時間で洪水を予測することは、避難活動や水防活動、治水施設の操作に有用な情報を与える。本稿では気候変動への対応を含めて、洪水対策と洪水予測技術の最近の進展を紹介する。

## 2. 三種類の洪水予測と予測技術

### 2.1 発生頻度に対応する洪水の大きさの予測

図1は京都気象台で観測された1901年から2008年の年最大日降水量の頻度分布を示したものである。年最大日

降水量とは、ある年の降水量を1日ごとに集計し365日の中で最大となる日の降水量を意味する。降水期間は2日あるいは24時間、48時間とすることもある。年最大日降水量は、平均値の周りに左右対称に分布するのではなく、ときどきまれな豪雨が発生するため、右側の方に裾の長い分布形状を示す。例えば対数正規分布を用いると、図1の実線のような確率分布関数をヒストグラムに当てはめることができる。この確率分布を用いて、年最大日降水量 $x_p$ を超える確率（超過確率）と超えない確率（非超過確率）を求める。超過確率の値を $p$ とすると非超過確率の値は $1-p$ となる。1年あたりに $x_p$ を超える確率が $p$ なので、 $1/p$ 年に1回は $x_p$ を超える年最大日降水量が発生すると考えることができる。 $1/p$ 年を再現期間とよび、我が国の大都市圏の一級河川では再現期間200年を安全性の水準としている。このようにして定めた降水量を入力値とし、コンピュータシミュレーションモデル（降雨流出モデル）を用いて河川整備の目標とする河川流量や水位を算定して<sup>(1)</sup>、この洪水規模よりも小さい洪水では被害が発生しないように治水整備が進められる。

気候変動の進行により、短時間の降水強度が今よりも強くなる可能性が指摘されている<sup>(2)</sup>。現在の200年確率の降水量や洪水流量の大きさは、将来はより短い再現期間で発生するようになるかもしれない。地球温暖化による将来の

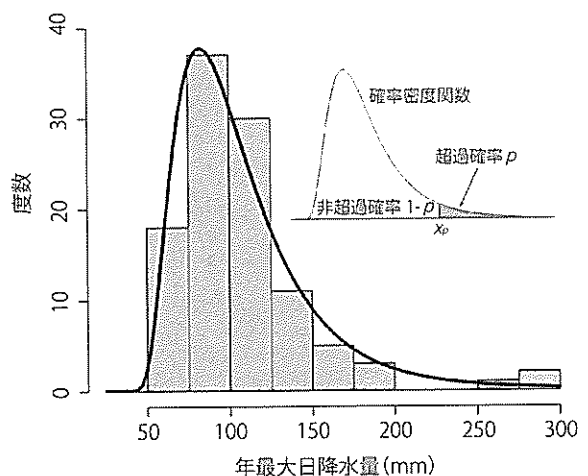


図1 京都気象台で観測された1901年から2008年の年最大日降水量の頻度分布とそれに当てはめた確率密度関数<sup>(1)</sup>

気候を予測するために、世界各国の気象研究機関がスーパーコンピュータを用いて将来の気温や降水量を予測している。気象庁気象研究所の超高解像度全球大気モデル<sup>(3)</sup>による21世紀末の将来気候推計情報を用いて、筆者らが計算した再現期間100年の日本全国の年最大流量の変化率の推定結果を図2に示す<sup>(2)(4)</sup>。この計算では、21世紀末には、北海道、東北地方北部、中国・四国地方および九州地方北部で再現期間100年の年最大流量が増加する傾向が見られた。ただし、日本全国どこでも年最大流量が増加するわけではなく、東北地方南部や北信越地方など洪水が積雪・融雪に起因する地域では、地球温暖化によって積雪・融雪量が減少することにより年最大流量が減少する傾向にあることも確認された。

気候変動下の確率的な洪水予測をより精度高く実施するためには、より長期間で高分解能の将来気候情報の生成が鍵をにぎる。文部科学省が実施した気候変動リスク情報創生プログラム<sup>(5)</sup>では、気候変動予測情報の高度化が図られ、さらにd4PDFという超多数アンサンブル気候予測データベース<sup>(6)</sup>が地球シミュレータを用いて作成された。d4PDFはデータ統合・解析システムDIAS<sup>(7)</sup>から誰もがデータを取得することが可能であり、さまざまな分野で気候変動予測や影響評価に用いられている。

## 2.2 物理的に起こり得る最大クラスの洪水予測

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波被害を契機として「津波防災地域づくりに関する法律」が定められた。また、最大クラスの津波を想定した浸水シミュレーションを実施して最大クラスの津波対策を講じることが指針として示された。これと同様に、最大クラスの風水害を想定してその対策を考える必要がある。我が国で大規模な風水害をもたらすのは台風であり、気候変動を考慮した上で最大クラスの台風を想定し、それによって

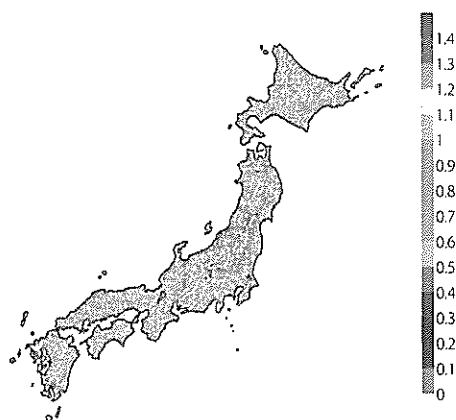


図2 再現期間100年の年最大流量の現在気候から21世紀末気候への変化比率<sup>(2)(4)</sup>(カラーの図は口絵参照)

引き起こされる洪水を予測することが重要な課題となる。

竹見ら<sup>(8)</sup>は、最大クラスの台風被害を分析するために台風の特徴を維持したまま初期位置を変化させて異なる経路の台風を生成する計算機シミュレーション手法を開発した。さらに地球温暖化が進行した場合の台風強度の変化を予測するために、海水温等を上昇させた場合の擬似温暖化実験を行い、過去に大水害をもたらした1959(昭和34)年の伊勢湾台風はこの手法を適用した。図3(上)は計算されたシミュレーション台風の経路であり、図3(下)は筆者らがこのシミュレーション台風の降雨を用いて計算した枚方地点(淀川流域の治水計画の基準地点)の最大流量の計算結果である<sup>(9)</sup>。この分析により、伊勢湾台風の経路は淀川流域の洪水発生について最も大きな洪水をもたらす経路であったこと、伊勢湾台風の擬似温暖化実験による河川流量の最大値は10%程度増加することが分かった。2013(平成25)年台風18号で発生した淀川の洪水は、擬似温暖化実験を上回る既往最大クラスの洪水であり、現実にごうした台風が発生していることに留意する必要がある。

最大クラスの洪水流量や浸水の広がりやを予測して、避難経路や避難場所が確保されるようなまちづくりや、浸水し

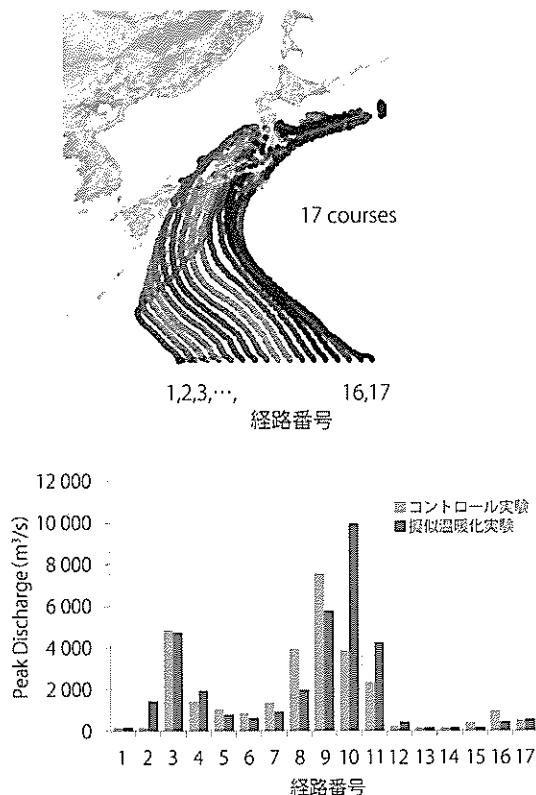


図3 伊勢湾台風の経路アンサンブル実験による台風コース(上)と台風コースごとに計算された淀川流域の治水計画基準点(枚方地点)での最大流量<sup>(9)</sup>

でも被害を最小限に留めることができるような地域づくりにその情報を生かし、ハード的な治水整備だけでは対応できない大洪水の発生に備える必要がある。

### 2.3 リアルタイムでの洪水予測

豪雨や洪水が進行している最中に数時間先の洪水を時々刻々と予測することを、リアルタイム洪水予測あるいは実時間洪水予測という。リアルタイム洪水予測では、時々刻々観測される降水や河川流量・水位の観測情報を用いて、数時間から数日先までの河川流量・水位を予測することが目的となる。河川流量・水位を実時間で予測することができれば、避難勧告や避難指示の発令、水防団や消防団による水防活動、住民の避難活動に有効な情報を与える。河川管理者によるダム貯水池での洪水調節など、治水施設を効果的に運用するためにもなくてはならない情報となる。

リアルタイム洪水予測を実現するためには、実時間での降水予測情報が必要となる。この降水予測情報を入力データとし、コンピュータシミュレーションモデル（降雨流出モデル）を用いて対象地点の河川流量や水位の予測情報に変換する。このとき、予測の確からしさも合わせて提供することが重要となる。降水予測情報には誤差が含まれる。また、降雨流出モデルも完全ではなく降水情報から河川流量を計算する際には誤差を伴う。これらのさまざまな誤差を考慮して、予測値とその予測誤差を合わせて提供することが重要である。図4はリアルタイム洪水予測のイメージ図である。現在時刻を13時として、13時から16時までの降雨予測情報が提供され、それから予測流量や予測水位が予測誤差とともに計算されるイメージを示している。

リアルタイム洪水予測では、時々刻々観測される気象・水文観測情報や予測情報を予測シミュレーションモデルに組み込んで、河川流量や水位の予測情報を迅速に配信する

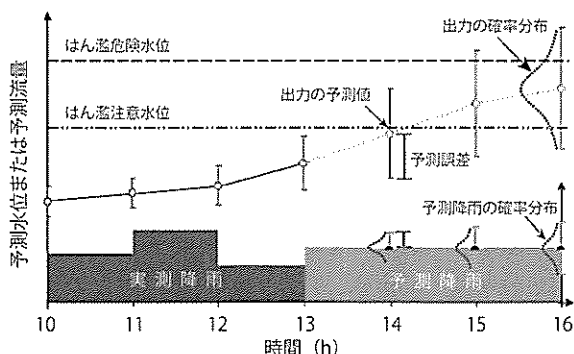


図4 リアルタイム洪水予測のイメージ図<sup>(1)</sup>。現在時刻を13時として、13時から16時までの予測降雨情報が提供され、それから予測流量や予測水位が予測誤差とともに計算されるイメージを示している。

情報システムを構築する。観測情報を用いて予測モデルの状態量やモデルパラメータを逐次更新する手法として、従来からカルマンフィルタなどのデータ同化手法を用いた実時間流出予測手法が開発されてきた<sup>(1)</sup>。最近では、並列計算機の普及とともにモデルパラメータや状態量の異なる多数の降雨流出モデルを同時に実行し、粒子フィルタを用いて逐次、観測情報を用いて推定・予測計算を繰り返す予測システムも構築されている。流量予測の精度向上だけでは水位予測の精度を上げることは難しく、リアルタイム予測に用いる水位計算手法の精度向上も必要である。対象河川区間の洪水流の水位・流量を計算する洪水追跡シミュレーションモデルを用いて、時々刻々フィルタリングしながらリアルタイム水位予測を実現することが、河川水位の予測精度を向上させるための重要な技術的課題である。

### 3. 情報通信技術と洪水予測技術の発展

国土交通省では想定最大規模の浸水想定を始めとして、外力規模の異なる浸水想定区域図を作成し、公開を開始している。一例として、近畿地方整備局琵琶湖河川事務所では、野洲川を対象としてこれらの浸水想定区域図を作成し、さらに野洲川下流の堤防決壊場所を任意に設定して、氾濫流が広がる様子をインターネットを通して閲覧できるようにしている<sup>(10)</sup>。従来のハザードマップに加えて、具体的な破堤地点を閲覧者が自ら設定することで、自身が住む地域の洪水氾濫の危険度をより具体的に把握することができるようになってきている。情報通信技術と洪水予測技術の高度化、情報提供方法の工夫により、従来のハザードマップでは表現が難しい水害危険情報の「見える化」が期待される。

気候変動が進んだ場合に水害の発生状況がどのように変化する可能性があるかも、今後は提供していく必要があると思われる。2.1節で紹介したd4PDFは、地球シミュレータを用いて日本を含む領域で空間分解能20km、過去実験3000年分、将来気候実験5400年分の気候シミュレーションが実施され、構築されたデータベースが公開されている。データはますます高分解能化され長期間となり、データ処理量は増える一方である。超巨大な気候情報から効率的に地域の防災・減災に役立つ防災情報を生成し、住民にわかりやすい形で情報提供する技術がますます要求される。

洪水予測情報を作成する観点からは、降雨情報などの気象外力をローカルな河川流量や水位、浸水情報に変換する水工シミュレーションモデルの高度化がより一層必要となる。国土交通省国土技術政策総合研究所が開発したCommonMP<sup>(11)</sup>はそうした展開を見据えて設計された水工

シミュレーションモデルのプラットフォームソフトウェアであり、国内での継続的な利用・発展とともに海外での適用例を充実させていくことが期待される。

リアルタイム防災情報については、河川水位や雨量の観測情報、XRAIN等によるレーダ降雨観測情報をインターネットを通していつでも閲覧できることが当たり前となり、自治体等から発せられる防災情報を、スマートフォンや携帯電話を通して入手することも容易となっている。今後は、観測情報だけでなく、より精度の高い河川水位や河川流量の予測情報を作成して公開することが重要である。実時間流量予測では、時間が経って予測対象時刻が現在時刻となれば、その時刻の予測流量と観測流量とを比較することができる。これによって予測モデルの適合性を時々刻々分析し、観測流量に適合するように予測モデルの状態量やモデルパラメータを時々刻々と調整することができる。電子計算機の高速度・並列化にともないさまざまなデータ同化手法が開発されつつある。電子計算機の処理速度の格段の向上と降雨予測の精度向上と相まって、高空間分解能の降雨流出モデルによる実時間予測計算も実現できるようになってきた。今後は、実時間での氾濫計算やその予測結果の配信も遠からず実現されるであろう。こうした実時間予測システムは、これまで主要河川流域ごとに個別に構築されてきた。今後は県管理の二級河川を含めて、日本全国の河川流域すべての予測計算を、一つの予測計算システムで実現することも考えられる。

#### 4. おわりに

洪水予測には三種類の異なる予測があることを述べた。これらの予測情報を用いて、さまざまな規模の洪水に対する防災対策を複合的に考える必要がある。ある整備目標を

定めて治水事業を進めるとして、それを超える洪水が発生する確率はゼロではない。そのときに生命を守り、被害を最小限に抑えるためには精度の高い実時間予測情報が欠かせない。また、最大クラスの洪水規模を予測することで、被害を最小限に抑える備え方を検討することができる。

そのためには、物理的な洪水・氾濫予測シミュレーションの高精度化が欠かせない。また、治水対策の効果や費用を合理的に評価する方法を確立していく必要もある。そのためには、洪水氾濫域の広がりや浸水深、浸水時間、氾濫域の広がりとそこでの土地利用、資産、人口分布から総合的に被害額を評価する手法を考案することが欠かせない。水害の発生域や被害の程度は、その原因である降雨や洪水流量の強度、それらの時空間分布に依存する。そのため、降雨強度が時空間的に分布するとして治水施設による洪水対策や、土地利用規制・建築規制などさまざまな洪水対策をシミュレーションモデルに織り込んだ上で、雨水が河川や流域を流下し、人口・資産が分布する流域が浸水する様子を再現して、その被害額を算定できるようになる必要がある。

そのためには、洪水流量の予測値の不確かさを確率的に評価する技術、堤防の破堤条件を設定する合理的な考え方とそのシミュレーション技術、治水施設や土地利用規制・建築規制による治水対策を織り込んだ洪水氾濫シミュレーション技術、複雑な水工シミュレーションモデルの構築を支援するモデリングシステムやシミュレーション結果を分かりやすく表示するソフトウェアの開発、治水対策の費用・便益を計測する技術の高度化、これらの水災害評価シミュレーションの基本となる様々な情報の蓄積とデータベース化など、やるべきことは多い。

#### 文 献

- (1) 椎葉充晴・立川康人・市川 温：水文学・水工計画学、京都大学学術出版会 (2013)
- (2) 文部科学省：21世紀気候変動予測革新プログラム、研究成果(総括) (2012)、<http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/jp/brochure.html>
- (3) R. Mizuta, H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Ssugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki, and A. Kitoh: "Climate Simulations Using MRI-AGCM3.2 with 20-km Grid", Journal of the Meteorological Society of Japan, 90A, pp.233-258 (2012)
- (4) 立川康人・滝野晶平・藤岡優子・萬和明・ムスンミン・椎葉充晴：「気候変化が日本の河川流量に及ぼす影響の予測」, 土木学会論文集, Vol.67, No.1, pp.1-15 (2011)
- (5) 文部科学省：気候変動リスク情報創生プログラム、<http://www.jamstec.go.jp/sousei/>
- (6) 文部科学省など：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, <http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/index.html>
- (7) データ統合・解析システム DIAS: <http://www.diasjp.net/>
- (8) 竹見哲也・石川裕彦・奥勇一郎・岡田靖子：「伊勢湾台風のアンサンブル実験、気候変動リスク情報創生プログラム」, 平成24年度研究成果報告書, pp.17-19 (2013)
- (9) 宮脇航平・立川康人・田中智大・石井大貴・市川 温・萬 和明・竹見哲也：「最大クラス台風を想定した淀川流域における洪水流出シミュレーション」, 土木学会論文集, B1 (水工学), Vol.72, No.4, pp.L31-L36 (2016)
- (10) 国土交通省近畿地方整備局琵琶湖河川事務所：洪水浸水想定区域図, <http://www.kkr.mlit.go.jp/biwako/simulation/sinsuisoutei/index.html>
- (11) 国土交通省国土技術政策総合研究所：水・物質循環解析プラットフォーム CommonMP, <http://framework.niim.go.jp/>



立川 康人

たちかわ やすと

1989年京都大学工学研究科修士課程修了, 1996年同大学防災研究所助教授, 2007年同大学工学研究科准教授 2013年同大学工学研究科教授, 現在に至る。