

洪水予測技術の現状と課題について

ON THE FLOOD PREDICTION, PRESENT STATE AND MATTERS TO RESOLVE

椿 涼太^{1,2}, 小林健一郎^{1,3}, 内藤正彦^{1,4}, 谷口 丞^{1,5}

Ryota TSUBAKI, Kenichiro KOBAYASHI, Masahiko NAITO and Susumu TANIGUCHI

¹土木学会水工学委員会河川部会流域減災ワーキンググループ

²正会員 広島大学大学院助教 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

³正会員 神戸大学大学院准教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台1-1)

⁴正会員 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3)

⁵正会員 横浜市道路局河川部河川計画課 (〒231-0016 横浜市中区真砂町2-22)

In this review paper, the state of the art flood forecasting in Japan is reviewed. Firstly several flood prediction approaches are classified and each approach is explained. Then, the accuracy of the current forecasting system in operation by MLIT is reviewed. The directions for the improvement of the forecasting system are also considered. The paper also stresses the importance of human resource that operates the flood forecasting model. Finally, the significance of the public announcement of the flood risk is emphasized

Key Words: Flood prediction, accuracy, storage function, water stage correlation function, distributed hydrological model

1 洪水の予測

洪水は河川・流域の水循環における重要なイベントであり、河川の治水・利水・環境に大きな影響を及ぼす。出水波形を予測することは河川管理を合理的・効果的に行う前提条件であり、様々なタイムスケールを対象として多様な目的で洪水予測が行われてきた。本総説は2013年度・河川技術シンポジウムにおけるオーガナイズドセッション「危機管理の実務に供する洪水予測技術」での議論を進める一助となるよう、河川技術論文集の掲載論文・報告、特に本巻の採択分を踏まえて、技術的概要、研究動向および運用の現状を概説する。現状の分析を踏まえて、取り組むべき課題を検討する。降雨の予測精度は、洪水予測の精度に大きな影響を及ぼすが、降雨予測技術自体については本総説では対象とせず、降雨や水位等の情報に基づいて行われる洪水予測技術を主な対象とする。

2 洪水予測技術

(1) 洪水予測技術の基盤的技術

洪水の予測技術には様々なものがあるが、図-1に示すように、上流下流の水位の相関関係などに基づき評価地

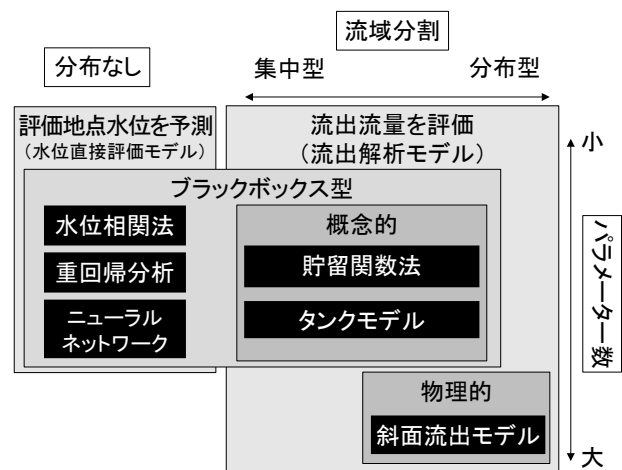


図-1 洪水予測モデルの分類

点の水位を直接予測する手法と、降雨から流出流量を評価する流出解析技術を基盤とする手法の二つに分類することができる。

ある程度大きな流域を対象とした場合に、河道内で洪水波形が相似的に上流から下流に伝搬していくことから、上流地点での観測水位に基づいて下流での洪水を予測することができる。最も単純なモデルとしては、洪水予測地点の水位と、上流観測地点ピーク水位との経験的相関

による水位相関法があげられる。その他に多地点の水位データを利用した重回帰分析モデルなども利用される。水位相関法は大流域の大規模洪水を比較的精度良く予測できるが、基本的なモデルでは降雨パターンの違いを考慮する仕組みがなく中規模の出水に対する適用性に課題があることが指摘されている¹⁾。本総説ではこれらの流量を介さず直接評価地点の水位を予測するモデルを水位直接評価モデルと総称することとする。

流出解析モデルでは、基本的に降水量を入力データとして流出流量を評価し、流量を水位に換算することで水位ハイドログラフを予測する。洪水予測に用いられるモデルとしては、比較的少数のパラメータで流出現象の非線形性を表現できるモデルとして貯留関数法が広く利用されてきた。貯留関数法は、基本的に流出事象に応じてモデルパラメータの調整が必要となることと、ピーク流量はある程度予測できるもののピーク時刻の予測精度の確保が困難となる傾向を有すると指摘されている¹⁾。

水位相関法や貯留関数法は、それぞれの手法に限界があるものの、双方とも比較的簡便な仕組みで実用的な予測ができる。実務においてはこれらの予測手法を併用して、その結果を比較しつつ将来の洪水を判断することも広く行われてきた²⁾。

(2) 基盤的技術の発展（水位直接評価モデル）

水位相関法に代表される水位直接評価モデルを中小流域に適用する場合には、降雨から河道水位の変化までのタイムラグが小さいため、上流の水位だけでなく流域への降水量も加味して下流の水位を予測する必要がある。例えば、谷岡ら³⁾により神田川（対象流域面積105km²）における水位相関法への降雨データ（地上観測データの補間と流域平均降雨の算定）の組み込みの事例が報告されている。また、天野ら⁴⁾は、松浦川流域（対象流域面積275km²）を対象に、地上観測およびレーダ雨量を用いた流域平均降雨データを用いた相関法による水位予測を行っている。

水位直接評価モデルの枠組みの中で入力・出力間の非線形性も考慮しながらブラックボックス的に洪水予測を行う方法に、ニューラルネットワークを利用するものが開発されている。例えば、稲吉ら⁵⁾による天白川（対象流域面積119km²）、一言ら⁶⁾による斐伊川（対象流域面積921km²）、槻山ら⁷⁾による阿武隈川（対象流域面積5400km²）でのニューラルネットワークの洪水予測への適用事例が報告されている。流域が比較的小さい天白川および斐伊川の事例では、単純な水位相関法と同様に降雨流入が下流水位に大きく影響することから、流域での降雨もニューラルネットワークの入力データとして利用されている。ニューラルネットワークの利用については、入力層・中間層・出力層の設計⁸⁾、立ち上がり部の再現といった予測目的を踏まえた学習プロセス設計や入力データ選択が精度確保に効果的（竹村ら⁹⁾）であるが、

学習経験のない事象での適応性は明らかでなく、さらなる事例分析によるモデル構築手順の一般化が期待される。関ら⁸⁾では阿武隈川（対象流域面積5265km²）および名取川（対象流域面積431km²）を対象に現行モデルの課題を分析し、課題の一つである未経験の規模の洪水への対応策として実績洪水の引き延ばしが試みられている。

(3) 基盤的技術の発展（流出解析モデル）

洪水予測に貯留関数法などのいわゆる集中型モデルを用いる際には、モデル設計、モデルパラメータの設定、流域での初期貯留水量の算定が予測精度確保のポイントとなる。モデルパラメータ設定については、パラメータを現実的な範囲でばらつかせた多数のアンサンブル予測を行い、その中から観測に近い結果を出力するものを選択していくことが行われている⁹⁾。また後者については、流域での初期貯留水量を直接算定することが事実上困難であることもあり、カルマンフィルタに代表されるデータ同化手法を用いた補正が行われている。

分布型モデルの洪水予測への利用事例も広がっている。これは、リモートセンシング技術やGIS等の普及により地形や降雨などの情報の時間・空間の分解能が向上したこと（例えば、木下らによるメソ気象モデルとXバンドMPレーダの併用計算¹⁰⁾、児島らによるレーザースキャナによる樹木ボリューム算定を元にした降雨遮断プロセスの算定¹¹⁾など）や、計算機の処理能力が大幅に向上したことなどが背景となっている。

分布型モデルの導入のもう一つの背景として、局所的な降雨による災害の頻発¹²⁾や、水防法改正などに伴う中小流域での洪水予測への要求⁴⁾なども挙げられる¹³⁾。分布型モデルは、比較的狭い流域区画を対象として流出過程を記述することで、集中型の観念的なモデル化に比べ、より力学的な立場で流出プロセスを記述できる点も特徴となる。

分布型モデルにおけるパラメータ調整法として重枝らによる多点河道水位に基づく実験計画法と応用曲面法を援用した流出モデルパラメータの最適化の事例が報告されている¹⁴⁾。宮田らは、土研分布モデルのモデルパラメータ推定において遺伝的アルゴリズムに類似するが収束パラメータの探索出発点依存性がより小さいSCE-UA法を用い、さらに観測点での予測値と観測値のずれを各メッシュの土壌水分量を調整することで補正し、観測値や貯留関数モデルとの比較を行っている¹⁵⁾。立川ら¹⁶⁾による熊野川の2つのダムの下流の594km²の流域を対象とした大規模出水の再現計算では、複数の出水を固定されたモデルパラメータで再現できることを確かめている。

洪水予測においては河道水位の予測結果の精度が高いことが第一に要求されることから、河道での観測水位などを利用して河道の状態量の同化を行うことも精度向上に効果的である。佐山ら¹³⁾は河道追跡モデルの流量を、バイアス補正カルマンフィルタを用いて同化している。

立川らは¹⁷⁾アンサンブルカルマンフィルタに類似するが非線形現象への適用性に優れるとされる粒子フィルタを用い、河道での洪水伝搬過程の同化を行っている。倉辻ら¹⁸⁾はUnscentedカルマンフィルタを用い河道での水位流量関係のコントロールを行っている。

(4) 中小流域への洪水予測の展開

分布型モデルは比較的狭い流域区画を直接取り扱い、また降雨の空間分布を直接考慮できるため、中小流域への適用性が基本的に高いと考えられる。立川らは流域面積211km²のダム上流区間を対象として、分布型流出モデルにおける入力情報の空間解像度や分布の及ぼす流出計算結果について報告している¹⁹⁾。その中で、降雨強度の空間的なばらつきが大きく、かつ空間スケールで小さい場合には、分布型モデルにおけるモデルパラメータの影響が流出計算結果に大きく影響すると分析している。原田・里深²¹⁾は、山地河川を対象とした流域面積と河道幅との相関式を提案し、山地河川の河道幅の違いを踏まえた洪水予測手法の開発を進めている。

集中型モデルの中小流域への展開として、天野ら⁴⁾は貯留関数法に加えて小規模流域での適合性がある合成合理式、降雨を考慮した水位相関法の三手法の予測結果の比較、観測値によるフィードバック手法、予測雨量の適用などについても報告している。その他の中小河川での洪水予測事例として、谷岡ら³⁾による神田川における水位相関法への降雨データの組み込みや、稲吉ら⁵⁾による天白川を対象にニューラルネットワークと準線形貯留モデルの比較検討などが行われている。河道形状や流量観測データがあまり整備されていない中小河川などの洪水予測に対しては、物理型モデリングの説明力を活かすことが困難であり、これらの情報を必要としない水位直接評価モデルを利用する事例がある

(5) ダムと洪水予測

ダムへの流入する洪水予測情報はダム運用・操作の判断材料となる（春原ら²¹⁾、永末²²⁾、平井ら²³⁾）。またダムの運用や操作は下流の洪水予測に大きな影響を与える。ダム運用上重要となるのは、日レベルでの流入量の予測であり、数時間程度の期間での波形、特に立ち上がり部分の再現性が求められる洪水予測とは相違がある。寒冷地では融雪出水が防災やダム運用上の要点であるが、本格的な融雪出水の開始日の正確な予測は困難である。西原・数馬田は融雪熱量とダム流入量の関係に着目し、融雪出水波形の評価方法を試みている²⁴⁾。

ダムの影響を受ける河道区間の洪水予測を行うためには、ダムの運用・操作も想定していく必要がある。実際にダムの操作が判断されるよりも早い時点で、その操作を想定する必要があると利用できる情報が異なることとなる。さらに、治水計画上のダムの運用・操作と操作規則の範囲内で、実際の運用・操作が異なる場合などは、洪水予測を行う上でのダム放流量予測の精度を下げ、下流

地点の洪水予測の不確実さを増加させる要因となる。ダムの運用・操作の実態を洪水予測に反映させることが必要である。例えば事前放流操作の規準化（永末²²⁾）などの取り組みもある。

3 洪水予測の実用的精度の現状

国土交通省国土技術政策総合研究所では、直轄河川における洪水予測の実態について、過去4カ年の365事象の概略調査を行った。この調査で対象とした洪水事象数は表-1に示すとおり、平成23-24年に発生した洪水事象が大半である。なお、予測は受託したコンサルタントの持つ予測システムを対象河川ごとに整備したシステムによりなされ、用いられるモデルの種類、フィードバック手法、モデルパラメータ調整の精度はそれぞれまちまちである。

実際の洪水予測では予測降雨を用いているが、本調査での予測精度の評価にあたっては、降雨予測の誤差の影響を除外した評価を行うこととした。このため、観測された実績降雨を洪水予測モデルに入力し、再現予測計算を行った結果を以て評価した。この章においては以下、再現予測を単に予測と呼ぶ。

評価対象とした洪水事象は、各直轄河川の洪水予報基準点で、実績水位が氾濫注意水位を1時間以上超過し、データに不備がない洪水事象とした。

評価項目は、

- (1) ピーク生起時刻の予測と実績の差
- (2) ピーク水位の予測と実績の差
- (3) 実績水位と予測水位の相関係数
- (4) 実績水位変化量と予測水位変化量の相関係数

とし、上記4項目それぞれの優劣を4段階で評価し、表-2の配点を与え、4項目の配点を合計し、総合得点を算出した。これらの評価に用いた予測水位は、現時刻から1時間先、2時間先、3時間先の3時刻での予測計算結果とした。この配点基準は、洪水予測担当官の予測精度に関する認識に合うように経験的に設定したものである。総合得点の分布をAからEの5段階に分類した。AからEの評価ランク分類は、365の事象が概ね均等になるようにした。

このような方法で算出した洪水予測の評価点の分布を図-2に示す。このように幅広い分布を示す要因の特定は非常に重要であるが難しい問題である。システムへの入力値の誤差、システムの調整不足、予測システムの構造上の問題等の様々な要因が結びついた結果であり、システム毎に要因を特定した上で改善策を分析する必要がある。

4 洪水予測の実用的精度の向上に向けて

表-1 評価対象洪水事象数

地整名	観測所数	評価対象洪水事象数					
		H24	H23	H22	H21	H20以前	計
北海道	128	11	21	4			36
東北	144	36	43	3			82
関東	130		18		2	23	43
北陸	150	2	31				33
中部	65	14	38				52
近畿	59	2	6				8
中国	91	4	23	6			33
四国	39		17	2			19
九州	160	27	25	3	4		59
年度別 合計		96	222	18	6	23	365

表-2 各評価項目別の配点基準

配点	ピーク 生起時刻差	ピーク 水位差	実績水位と予測水位 の相関関係	実績水位と予測水位変化量 の相関関係
10	±1 時間以内	±0.5m 未満	0.90 以上	0.90 以上
5	±2 時間以内	±1m 未満	0.75 以上	0.75 以上
2	±3 時間以内	±2m 未満	0.50 以上	0.50 以上
0	±4 時間以上	±2m 以上	0.50 未満	0.50 未満

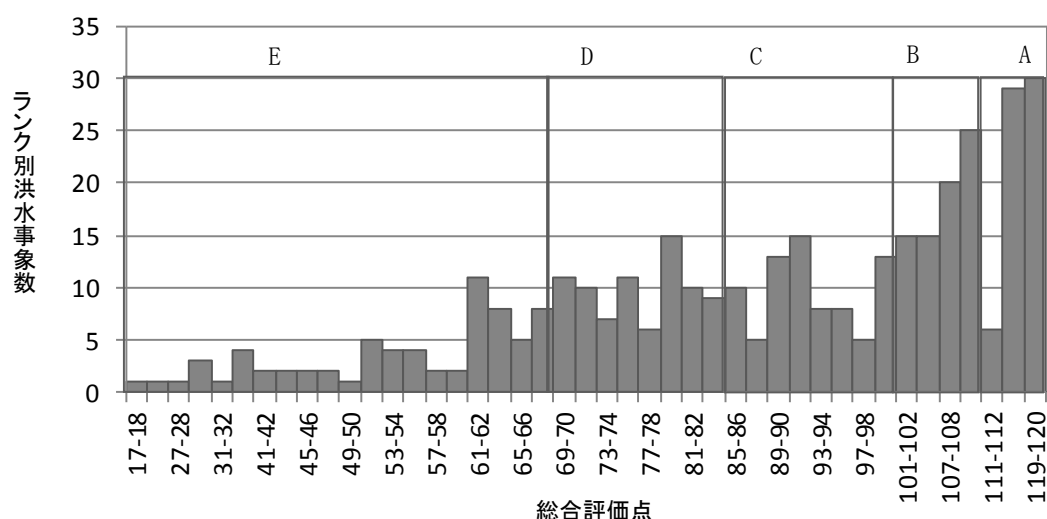


図-2 総合評価点のヒストグラム

(1) 流域・河川に関するデータ

河道形状や洪水の水位等の観測情報は洪水予測の初期値、パラメータ設定、境界条件、データ同化などに利用される。観測情報の質と量を確保することが基本となる。水位と流量を水位流量曲線で関連づけることに起因する流量あるいは水位の不確かさは洪水予測モデルの実行や検証の際に大きな障害となる^{16), 25)}。また観測態勢が構築されていても、発生頻度の小さい大規模な出水の観測データが不十分あるいは取得できていないことにより、大規模出水に対する水位流量曲線の精度には限界がある¹⁴⁾ことが多い。従来の流量観測手法だけでなく、流量観測手法を高度化、合理化していくことや、連続観測が可能な手法も併用していくとともに、複数の手法の中から現地条件に応じて適切な手法を選定することも重要である。

一次元や二次元の不定流計算を利用した水位算定や、不定流計算と多地点水位観測データを用いた流量算定技術や非定常性を考慮した水位・流量の関連づけ（本永ら²⁶⁾）などの技術により、水位算定の高度化を図っていくことは大規模出水や流量観測データの少ない河川における洪水予測精度に貢献できると考えられる¹⁶⁾。

河道の形状や植生繁茂状況なども河道での洪水伝搬に影響を与えるが、指定区間や二級河川などでは十分にこれらの河道情報が整備・管理されていない区間もあるのが現状である。従来の横断測量や航空写真だけでなく、レーザー測量などの技術の適切に利用していくことも必要となろう。自然災害リスクを事前に評価し、そのリスクに応じた準備をしておくことが重要であり、そのためには河川・流域や洪水に関する基礎データを平素から整備・管理していくことが必要である。河川技術開発に携わる研究者・技術者は、これらのデータの整備・管理を

促していくことも必要である。

(2) 条件設定について

十分な質・量の観測値が確保できると、分布型モデルの妥当性を検証・向上できることが期待できる。たとえば、流域の複数地点で流量観測データが存在することで流域全体での流出過程の再現性を確認できるだけでなく、データ同化などの技術により流出予測精度を向上させることにもつながる²⁷⁾。大流域の洪水予測では上流の流量データが境界条件として利用される。

観測情報の前処理、例えば各種地上観測やレーダ降雨量などの複数の降雨情報をどう整理・利用していくかで洪水予測の結果は変化する⁶⁾。

複数の境界条件の個別誤差が、ある程度打ち消し合って下流の予測値への影響が薄れる場合もある。このような状況は、分布型・物理型モデルのアプローチの利点が活かされず、降雨パターンが変化した場合などに予測精度が低下する恐れがある。

(3) モデルの特性の理解・改善

流出解析の手法は水収支に着目した分析法であるが、短時間の極端現象である流出イベントでの洪水の波形そのものを予測することに特化したものではない。物理的モデルにおいてはモデル係数の一般化・固定化などが期待され、そのことは洪水予測の説明力を確保することにつながるが、洪水波形の予測精度自体を直接向上させる保証があるわけではない。現状においてモデル構成の検討や、モデル係数の一般化は進行中であり、これらの基礎的研究をさらに進めていく必要がある。

ブラックボックス的な水位直接評価モデルでは、類似した既往データがない場合の再現性が確保できないという本質的な問題を抱えるが、適切なモデル調整を行う事で中規模出水を安定的に予測することができる。これまでの比較的絞り込んだ入力データを用いる手法だけでなく、洪水予測に利用できるデータの時空間的な密度、量や質が大幅に向上しつつある点を踏まえた新たな水位直接評価手法の構築を進めることで洪水予測の精度向上が期待できる。

(4) データ同化

データ同化は、予測精度を向上させる強力な手段であり、特にリアルタイムな予測が必要となる場面でフィードバック手法とともに広く利用されている。一方で、例えば物理的モデルで評価された流出流量に対してデータ同化を適用するということは本来の物理的モデリングの特性を変えていく点に留意する必要がある。観測値と予測値の差が生じた原因の検討を行い、その原因の本質的改善を検討していくことも、さらに洪水予測の精度を向上させるとともに、予測の透明性を確保する上で重要である。

(5) 透明性・実用的精度

洪水予測システムは、運用を続けていく中で、本運用前の検証時の予測性能が発揮できない事例に遭遇することがあり、運用を続けながらモデルの改善や調整を続けていくべきものである。例えば現場レベルに於いて、現在の所、分布型モデルが必ずしも高精度な洪水予測を実施できていない事例もみられ、その要因の分析も多角的に推進していく必要がある。

予測手法の違いによる影響を明確にしていくためには同一流域を対象に、複数のモデルを用いた予測結果を比較していくことが有効であり、特にブラインドテストによって評価していくことは、実用的精度を評価するためには有効である。

流域特性・河川特性・降雨特性は洪水予測や降雨予測の誤差発生の要因として挙げられるものの一つであるが、これらを具体的に検証し、さらにどのように対処していくべきであるのかを合理的・具体的に検討するためには、多数の流域での洪水予測結果を包括的に分析していく必要がある。

(6) 予測誤差の分析と利用

リードタイムを確保しつつ洪水予測結果を避難行動などに結びつけるためには、自治体や市民へ洪水予測情報を、適切に伝達していく必要があり、その際に予測情報の質についての正しい認識を共有する必要がある²⁹⁾。洪水予測の精度について、降雨の観測・予測誤差³⁰⁾をモデル化し、その誤差が洪水予測へ及ぼす影響を定量的に分析すること³¹⁾は、洪水予測の誤差量を踏まえつつリードタイムを確保しつつ防災・減災を進めていく上で重要である。

中小流域については降雨パターンの相違も流出に大きな影響を与える³²⁾。リアルタイム予測を行う上でも気象予測のアンサンブル情報を活かして、着目する流域にとっての危険側の予測を把握しておくことも効果的である³³⁾、³⁴⁾。

5 おわりに

本総説では洪水予測技術の概要を述べ、実務状況を分析した。比較的大きな流域を対象としていても、実務レベルでの洪水のピーク時刻・流量について安定的に予測できる段階には至っていない事例もある。洪水予測技術の精度向上を図ること、例えば様々な流域・洪水イベントを統一的な手順で予測できる技術開発を進めていくことは、洪水予測モデルを運用する態勢予算や人的資産に限りがある中で防災・減災の実効性を確保していく点で重要である。また予測誤差も含む不確実性を考慮した上で、防災・減災の実務に結びつけるには、予測結果を具体的なリスク情報としてどのように表記し、伝達していくかも重要で、そのためにも洪水予測に関わる知見をも技術者の果たす役割は大きい。

謝辞 本総説の執筆にあたり、土木学会水工学委員会河川部会メンバーに多大なご協力を頂きました。洪水予測システムを構築したコンサルタント、学識経験者などにヒアリング・アンケート等で貴重なコメントを頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献 (*印を付したものは本論文集に掲載されているもの)

- 1) 槻山ら：ニューラルネットワークによる阿武隈川洪水予測の基礎的検討，河川技術論文集，第9巻，pp.173-178，2003.
- 2) 石野和男，本田隆英，伊藤一教，宮田康一：仮締め切り工の越水管理を目的とした石狩川流域におけるリアルタイムレーダ雨量データ等を用いた出水予測警報システムの開発と現地検証，河川技術論文集，第17巻，pp.425-430，2011.
- 3) 谷岡康，福岡捷二，岩永勉，北川明：都市域中小河川における洪水水位と雨量の直接的関係を用いた洪水解析—東京都神田川の事例—，水工学論文集，第38巻，1994.
- 4) 天野卓三ら：中小河川における各種洪水予測モデルの適用性に関する研究，河川技術論文集，第9巻，pp.61-66，2003.
- 5) 稲吉ら：ニューラルネットワークモデルによる二級河川での洪水予測の基礎的検討，河川技術論文集，第9巻，pp.179-184，2003.
- 6) 一言正之，服部洋佑，梶正範，小野寺勝，桜庭雅明：斐伊川を対象としたニューラルネットワーク洪水予測の精度向上に関する研究，河川技術論文集，第18巻，pp.441-446，2012.
- 7) *竹村仁志，眞間修一，石上尚：中流域に洪水調節ダムを有する河川における洪水予測システムの精度検証，河川技術論文集，第19巻，2013.
- 8) *関 基ら：河川特性を反映したニューラルネットワーク洪水予測の精度向上，河川技術論文集，第19巻，2013.
- 9) 立川康人，市川温，椎葉充晴：貯留関数法のモデルパラメータの不確実性を考慮した実用的な実時間流出予測手法，水文・水資源学会誌，第10巻6号，pp.617-626，1997.
- 10) 木下篤彦，神野忠広，竹下航，坂井紀之：高密度・高頻度雨量データを利用した六甲山系における降雨特性の検討，河川技術論文集，第18巻，pp.429-434，2012.
- 11) 児島利治，篠田成郎，Mahboob, M.G., 大橋慶介：降雨遮断モデルによる実時間洪水予測精度の高度化に関する研究，河川技術論文集，第18巻，pp.435-440，2012.
- 12) 阿部徹：危機管理の課題と展望～防災・災害情報の共有化に向けて～，河川技術論文集，第8巻，pp.49-54，2002.
- 13) 佐山敬洋，立川康人，寶馨：バイアス補正カルマンフィルタによる広域分布型流出予測システムのデータ同化，土木学会論文集B, Vol.64, No.4, pp.226-239, 2008.
- 14) 重枝未玲，秋山壽一郎，野村心平：実測水位に基づく分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルのパラメータ最適化，河川技術論文集，第18巻，pp.459-444，2012.
- 15) *宮田昇平ら：分布型洪水予測モデルのパラメータ同定及びフィードバック手法に関する研究，河川技術論文集，第19巻，2013.
- 16) *立川康人，日野貴嗣，キムスンミン，椎葉充晴：2011年熊野川大洪水の再現計算からみた実時間河川水位予測の精度向上への課題，河川技術論文集，第19巻，2013.
- 17) 立川康人，須藤純一，椎葉充晴，萬和明，キムスンミン：粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発，水工学論文集，第55巻，pp.S511-S516, 2011.
- 18) *辻倉裕喜，田中耕司，杉浦正之：Unscented Kalman Filterを用いた洪水到達時間の短い流域を対象にした水位予測システムの適用，河川技術論文集，第19巻，2013.
- 19) 立川康人，永谷言，寶馨：分布型洪水流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価，京都大学防災研究所年報，第46号，B-2, pp.1-16，2003.
- 20) *原田紹臣，里深好文：土砂移動を考慮した洪水予測技術に関する研究，河川技術論文集，第19巻，2013.
- 21) 春原常男ら：ニューラルネットワークモデルによるダム諸量予測と相模川洪水予測システムの検討，河川技術論文集，第12巻，pp.229-234，2006.
- 22) 永末博幸：ダムの弾力運用 その1（青蓮寺ダムの事前放流操作の事例），語り継ぐ河川技術—技術体験集—，近畿地方整備局 河川部，2010.
- 23) 平井洋平ら：予測流入量情報を用いたダム事前放流操作の影響分析手法に関する基礎的検討，土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.I_1627-I_1643, 2013.
- 24) *西原照雅，数馬田貢：気象・水文観測値から融雪期のダム流入量を予測する一手法，河川技術論文集，第19巻，2013.
- 25) 橋本識秀，兪朝夫，星 清：洪水流出予測における実際の課題とその解決法，水工学論文集，第36巻，pp.567-572，1992.
- 26) 本永良樹，銭潮潮，山田正，山坂昌成：水位-通水能曲線（HK曲線）を利用した新しい流量算定手法，土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.I_1357-I_1362, 2012.
- 27) 立川康人ら：広域分布型物理水文モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用，自然災害科学，Vol.26-2, pp.189-201, 2007.
- 28) *田中耕司ら：淀川三川合流区間を対象にした水位予測システムの開発，河川技術論文集，第19巻，2013.
- 29) 石原正仁ら：平成23年台風第12号，第15号による豪雨にかんする研究会 研究報告，天気，Vol.59, No.3, pp. 43-49, 2012.
- 30) 東海林勉，星清，藤田暁：降雨予測情報の推定誤差に関する定量的解析，河川技術論文集，第10巻，pp.53-58，2004.
- 31) 田中耕司，辻倉裕喜，大八木豊，杉浦正之：予測雨量誤差を考慮した洪水予測システム開発，土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.I_1591-I_1596, 2013.
- 32) 吉見和紘，山田正：利根川上流域における降雨パターンに着目した洪水流出解析とダムの治水効果の評価，土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.I_1621-I_1626, 2013.
- 33) 小林健一郎，大塚成徳，寶 馨，折口征二，斉藤和雄：中小河川流域における豪雨・洪水のアンサンブル予測，土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.I_1597-I_1602, 2013.
- 34) *Wansik Yu et al.: Assessment of probabilistic flood forecasting using ensemble NWP rainfall with 30hr forecast time during typhoon events, Advances in River Engineering, JSCE, Vol.19, 2013.

(2013. 4. 4受付)