

降雨・洪水予測技術の高度化に向けた レーダ雨量情報の高度化と活用の動向

TRENDS OF PROGRESS AND APPLICATION OF RADAR RAINFALL INFORMATION FOR THE ADVANCEMENT OF RAINFALL AND FLOOD FORECASTING TECHNOLOGY

土屋修一¹・川崎将生²・深見和彦²・根本深³・内藤正彦⁴・五道仁実³
Shuichi TSUCHIYA, Masaki KAWASAKI, Kazuhiko FUKAMI, Shin NEMOTO,
Masahiko NAITO and Hitomi GODO

¹正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 河川研究部 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 修(工) 国土技術政策総合研究所 河川研究部 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

³正会員 修(工) 国土交通省水管理・国土保全局 (〒100-8918 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3)

⁴正会員 学(工) 国土交通省水管理・国土保全局 (〒100-8918 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3)

The purpose of this review is to clarify the issues to cope with from now in order to establish more reliable and practical flood forecasting technology. This paper, as the outline of the recent efforts aimed at advancement of flood monitoring and forecasting technology by MLIT, describes the advancements of topography data, rainfall information, water level measurement, flood forecasting model and data assimilation. The current accuracy of radar rainfall information and trends of its application research for rainfall and flood forecasting are also introduced.

For rainfall forecasting, it is noted that the technology to forecast guerrilla-type heavy rain forecasting has been proposed and its forecasting accuracy with new radar rainfall information (XRAIN) has been improved. For the improvement of flood forecasting, it is important to make the best use of existing and/or new adhoc type of water level gauging data, to improve the accuracy of flood flow observation, and to innovate rainfall-runoff model & its feedback system.

Key Words : flood forecasting, rainfall forecasting, distributed runoff model, radar rainfall,

1. はじめに

近年、記録的な豪雨が頻発し、それにより各地で水害が発生している。また、地球温暖化の進行に伴う豪雨発生頻度の増加が指摘されており¹⁾、今後、河川の内水、外水氾濫の頻発化が懸念される。水害による人的、資産被害の軽減を図るためには、河川氾濫やその可能性のある状況下において、適切な対策を時々刻々と講ずる危機管理が重要である。降雨や河川水位の実況を把握することに加え、数時間先の状況変化を予測することは、的確な防災活動や避難を行う上で、必要不可欠な情報であり、豪雨・洪水監視、洪水予測技術の高度化の取り組みの重要性は高い。

本総説は、国土交通省が管理する河川(直轄河川)における豪雨・洪水監視と3~6時間程度先を対象とする洪水予測技術の高度化に向けた取り組みを概説し、その取

り組みの一つであるレーダ雨量情報の高精度化の現状と、これを活用した降雨・洪水予測技術の動向を総括し、実務に資する洪水予測技術の確立に向けて、今後、取り組むべき課題を明確にすることを目的とする。

2. 豪雨・洪水監視、洪水予測技術の高度化の取り組み

国土交通省では、豪雨・洪水監視、洪水予測技術の高度化の取り組みとして、河道、流域に関する基礎データ、雨量、水位といった水文観測データの高度化や洪水予測モデルの改善を進めている。本節では、航空レーザ測量による地形データ、レーダによる雨量情報、簡易水位計を用いた多点観測による河川水位の監視、分布型流出モデルを導入した洪水予測、データ同化技術による洪水予測技術それぞれの高度化の取り組みについて概説する。

洪水予測の精度向上には、降雨予測情報の精度改善、洪水予測モデルの再現性向上の2つが主な課題となる。洪水予測モデルには、評価地点の水位について、流量を介さずに直接的に予測する水位直接評価型モデルと、降水量を入力データとして、流出モデルにより降雨を河川流量に変換し、河道モデルにより河川流量の河道流下を計算し、流量を水位に換算し予測する流出解析型モデルがある²⁾。直轄河川の洪水予測システムのメインモデルとして採用されている洪水予測モデルは、主に後者であり、前者は少ないが、サブモデルとして併用されている場合がある。本節で概説する取り組みは、直轄河川を対象とする洪水予測システムについて、主に流出解析型モデルの再現性向上に資するものとなる。

(1) 地形データの高度化

洪水予測モデルでは、流域の地形として50mメッシュ地形データが主に利用されている。なお、50mメッシュ地形データは、1m程度の標高誤差があることが知られている³⁾。国土交通省では、航空レーザ測量により地形データの高分解能化、高精度化を行い、標高誤差30cm程度の5mメッシュ地形データを、全ての1級河川の沿川について整備している⁴⁾。流域地形を考慮可能な分布型流出モデルを用いた洪水予測において、ある程度のスケール以上の流域の計算では、地形の空間解像度による流出計算の再現性に、違いは見られない場合があるが、地形は河道への流出波形に影響を与えることから、一般的に、正確な地形データを洪水予測モデルへ反映することで、洪水予測の精度改善が考えられる⁵⁾。

(2) 雨量情報の高度化

雨量は、河道への流出量、流出波形に強い関係性があり、実績雨量は、洪水予測において予測開始時点のモデルの貯留量などの状態量の算定に用いられ、洪水予測の精度に大きな影響を与える。

流域の雨量を洪水予測モデルに与える場合、複数の地上雨量計の雨量データからティーセン法等を用いて、面的な雨量を与える例が多い。国土交通省では、気象庁、水資源機構、自治体等と協定を結び、これらの機関が管理する地上雨量計（都道府県：4981地点、気象庁：1289地点、水機構：73地点）のデータを取得し、国土交通省が管理する地上雨量計(2409地点)に加えてティーセン分割を詳細化することで、精度向上を図っている。

また、分布型流出モデルでは、レーダによる面的に詳細な雨量分布を洪水予測に用いる例が増えており、空間分解能1kmメッシュ、観測間隔5分のCバンドレーダ雨量情報が主に利用されている。Cバンドレーダは、Z-R関係式による雨量算定のみでは、定量的な観測は難しいことから、地上雨量データを用いてCバンドレーダから算定される雨量のオンライン補正が行われている⁶⁾。国土交通省では、自らが管理する雨量計に加え、他機関の雨

量計のデータを合わせて用いることで、Cバンドレーダ雨量の定量的性の向上を図っている。さらに、国土交通省では、レーダ雨量情報の高精度化、時間、空間分解能の詳細化を図るため、XバンドMPレーダの設置を進め、空間分解能250mメッシュ、観測間隔1分の雨量情報を提供しており、Cバンドレーダ雨量情報と比べ、空間分解能16倍、時間分解能5倍、観測精度についても同等以上となっている⁷⁾。

時空間的に高分解能かつ高精度な雨量データにより流域の降雨状況を正確に反映することで、洪水予測の精度改善が期待される⁸⁾。

(3) 河川水位の監視の高度化

直轄河川において、水位観測所は概ね10～15km間隔で設置されている⁹⁾。しかし、水位観測所は、治水や利水計画等の策定を前提として設置されているため、洪水予測モデルへの活用や危機管理用途としての水位監視を行う上では、密度が不十分であり、必ずしも適切な位置に設置されていない場合がある。国土交通省では、通常の河川管理や危機管理に当たり、重要な箇所での水位を詳細かつリアルタイムに把握するため、センサー部に低コストで実績のある圧力式水位計を用い、観測データをアドホックと呼ばれる無線通信技術でリアルタイム伝送する、安価で容易に設置が可能な計測技術を開発し、一部の河川区間で約1km間隔の多点水位観測が行われている¹⁰⁾。

洪水予測モデルでは、水位データを用いて、フィードバックやデータ同化手法によるモデル状態量やパラメータのリアルタイム補正が行われる。縦断方向の水面形の観測値を解とする解析により流量等を高精度に推算可能なことから¹²⁾、フィードバック等に多点水位観測データを用いることで洪水予測の精度改善が考えられる。

(4) 洪水予測モデルの高度化

直轄河川に導入されている多くの洪水予測モデルは、流出現象の非線形性を表現する貯留関数法などのいわゆる集中型モデルである。近年、レーダ雨量観測技術の高度化により精度が高く、詳細な雨量分布を反映できる分布型流出モデルの導入が有力な選択肢の一つとなりつつある。分布型流出モデルは、モデルパラメータが膨大となり、適切なパラメータ設定方法の確立等の課題があるものの¹¹⁾、集中型モデルと比べ、物理的な流出過程を表現することにより降雨事例に依存しない安定的な精度を有するといった有効性が報告されている⁹⁾。

(5) データ同化技術の高度化

洪水予測モデルには、洪水予測の精度向上手法として、フィードバックやカルマンフィルタといったデータ同化によるモデル状態量やパラメータのリアルタイム補正手法が導入される例が多い。国土交通省では、河川砂防技

術研究開発公募の2013年度の水防災技術分野の研究開発テーマとして、「洪水予測技術の研究開発」を設定している。その採択課題の一つである京都大学グループ（代表：立川教授）の研究において、粒子フィルタと呼ばれるデータ同化技術によるリアルタイム補正技術の開発と洪水予測への適用に関する研究開発が行われている¹³⁾。

3. レーダ雨量情報の高度化の現状

レーダ雨量情報の高度化について、前節で概説したところであるが、本節ではレーダ雨量観測の高精度化、洪水予測への活用の課題及び今後の展望について述べる。

(1) レーダ雨量観測の高精度化

国土交通省は、1976年に赤城山に約5cmの波長の電波を使用し、水平の偏波面を持った1種類の電波を送受信する単偏波のCバンドレーダを設置して以来、順次全国に整備し、現在、26基のCバンドレーダネットワークにより、全国の降雨状況を監視し、雨量情報を河川管理、防災情報や洪水予測等に活用している。これに加え、近年、日本の各地で頻発するいわゆるゲリラ豪雨と呼ばれる局地的な大雨や集中豪雨を的確に捉えるために、国土交通省では、約3cmの波長の電波を使用し、水平と垂直の2種類の偏波を送受信することが可能な二重偏波のXバンドレーダ(XバンドMPレーダ)を35基(2014年3月現在)設置し、XRAINと呼ばれるレーダネットワークを構築している。

図-1は、2013年9月15日に岩手・宮城地域の豪雨を観測したものであり、亘理(わたり)アメダス地点の地上雨量計で観測した雨量並びに亘理アメダス地点に対応するメッシュのXRAIN、Cバンドレーダ雨量の時系列(10分値)を示している。Cバンドレーダ雨量は、地上雨量計と比較して降雨の前半のピークが過小であり、後半のピークが過大であるが、XRAINでは、雨の降り始め、前後半のピーク及び降り終わりに至る雨量が地上雨量計とほぼ一致しており、雨量及びその時間変化を精度良く観測できていることが確認できる。なお、XRAINでは、精度の高い雨量算定手法(Kdp-R関係式)が使用できるため、地上雨量計を用いた補正等を行わずに、観測から1～2分程度で配信することが可能である。

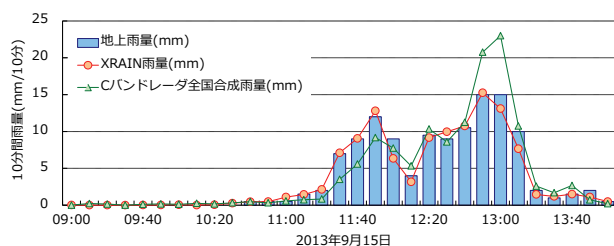


図-1 地上雨量, XRAIN, Cバンドレーダ雨量の時系列

図-2は、船橋レーダ(XバンドMPレーダ)について、定

量観測範囲内(半径60km)の地上雨量計(10分雨量)とそれに対応するメッシュのレーダ雨量(10分雨量)を比較したものである。また、図-3は、船橋レーダの定量観測範囲に対応するCバンドレーダ雨量について、同様に地上雨量と比較したものである。船橋レーダは、地上雨量との対応において、ばらつきが見られるものの、Cバンドレーダと比較してその程度は小さく、地上雨量との対応性が高いことが確認できる。

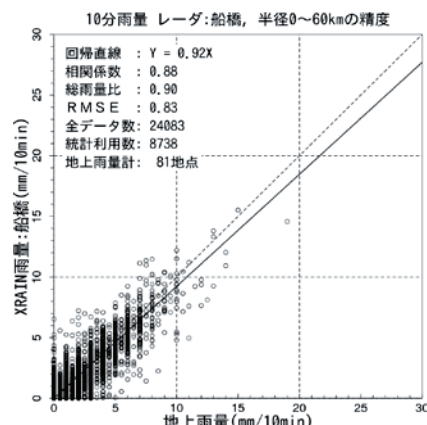


図-2 XRAIN雨量と地上雨量の比較

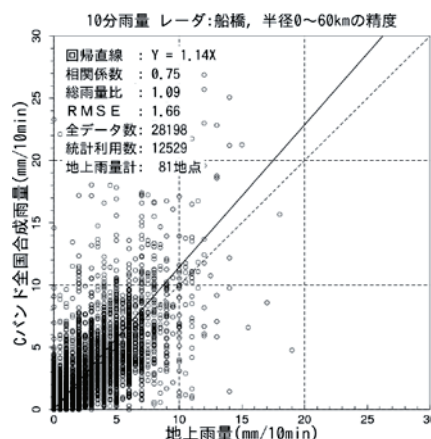


図-3 Cバンドレーダ雨量と地上雨量の比較

この他、各地域で観測された降雨事例について観測精度を同様に比較した結果、いずれの地域においてもCバンドレーダに比べXRAINは地上雨量計と良く対応した観測結果となっている。また、XRAINは、Cバンドレーダでは難しかった時間的に急激に変化する降雨事例においても精度良く観測ができていること、地上雨量との対応関係がCバンドレーダよりも小さいばらつきとなっていることから、XRAINの観測精度は、Cバンドレーダと同等以上であり、XRAINの導入によりレーダ雨量の高精度化が図られている。

(2) XRAIN雨量の洪水予測への活用の課題

XバンドMPレーダは、使用する波長の電波の特性やアンテナサイズ等から観測範囲が半径80km(定量観測範囲：半径60km)であり、Cバンドレーダの半径約200kmま

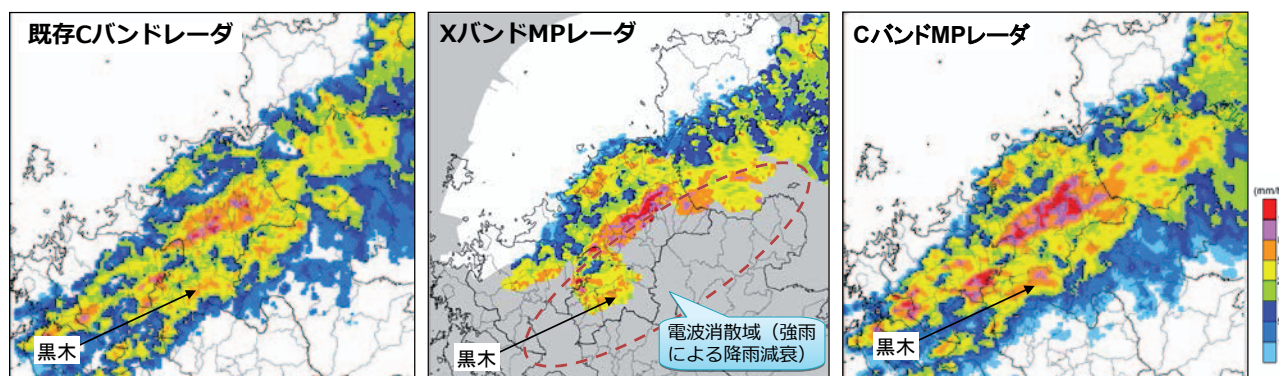


図-4 2012年九州北部豪雨時のレーダ画像

たは300km(定量観測範囲：半径120km)と比較して、1基のレーダによる観測範囲は狭い。また、XバンドMPレーダの配置は、都市域等を高精度かつ安定的な(欠測が生じない)観測が可能となるように計画されており、直轄河川流域をカバーすることを目的とする配置となっていないため、流域全体がカバーされている直轄河川の流域は一部に限られている。さらにXバンドMPレーダの観測精度は、レーダから遠方となるほどビーム高度が高くなる等の影響で観測精度が低下する傾向にあり、降雨流出の寄与の大きい山間部がレーダから遠い場合、観測精度は必ずしも高くない。この他に、XバンドMPレーダは、使用する波長の電波の特性から降雨により電波が減衰(降雨減衰)しやすく、豪雨時に強く降雨減衰することで観測不能領域が発生する場合がある。観測不能領域により雨量データは欠測値となるため、流域雨量や時間雨量等を算出することができない場合がある。

(3) レーダ雨量観測の今後の展望

今後、都市域に4基のXバンドMPレーダの追加設置により、XRAINのカバーエリアの拡大が予定されている。また、前述の課題への対応、広域の観測精度向上を図るため、既存の単偏波のCバンドレーダにも二重偏波(MP)の技術を導入し、レーダ雨量情報の高度化を進める方針としている。現在、26基のCバンドレーダの内、5基(2014年3月現在)がMP化されているが、今後、機器更新のタイミングで順次MP化されていく予定である。

図-4は、2012年九州北部豪雨時のレーダ画像であり、左図は既存のCバンドレーダの全国合成雨量、中図はXバンドMPレーダの合成雨量、右図はMP化されたCバンドレーダである釈迦岳レーダ(以下、CバンドMPレーダ)のレーダ雨量画像である。なお、CバンドMPレーダ雨量は、地上雨量データを用いた補正は行われていない。CバンドMPレーダと既存のCバンドレーダを比較すると、雨域内の降雨量の多寡に違いがあるものの雨域形状、雨域内の雨量分布のパターンは概ね一致している。また、XバンドMPレーダでは、強雨による降雨減衰で観測不能領域が発生し、雨域全体を捉えられていないが、XバンドとCバンドMPレーダと比較すると、観測された雨域形状、雨量分布の多寡がほぼ一致している。図-5は、同

事例における2012年7月14日の黒木アメダス地点の地上雨量とそれに対応するメッシュの既存Cバンドレーダ、Xバンド及びCバンドMPレーダの雨量時系列を示している。既存のCバンドレーダは、ピーク時付近で過小傾向を示していることや過大傾向を示す時間帯がある。一方、CバンドMPレーダは、XバンドMPレーダと比較してピーク付近でやや過大傾向であるものの、雨の降り始め、ピーク、降り終わりに至る雨量が地上雨量と概ね一致しており、地上雨量による補正を行わずとも、雨量及び時間変化を精度良く観測できていることが確認できる。

CバンドMPレーダは、地上雨量による補正を行わずとも、既存のCバンドレーダと同等以上の精度での観測が可能であり、XバンドMPレーダと同等の観測間隔(1分間隔(既存Cバンドレーダ：5分間隔))、観測から配信に要する時間(1～2分程度(既存Cバンドレーダ：10分程度))で雨量情報の配信が可能となり、雨量情報の高度化が期待される。また、これによって、XバンドMPレーダとの連携が可能となり、XバンドMPレーダの観測範囲外や降雨減衰による観測不能領域をCバンドMPレーダで補間することで、広域の観測精度向上とXバンドMPレーダが整備された都市域等の安定した観測が期待される。

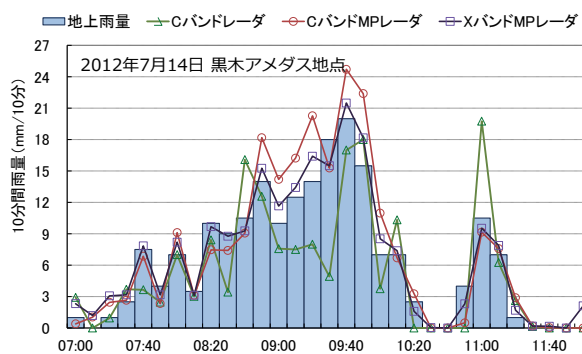


図-5 2012年九州北部豪雨時のレーダ雨量の時系列

4. XバンドMPレーダ雨量情報を活用した降雨・洪水予測技術の動向

国土交通省では、河川砂防技術研究開発公募において、本制度が創設された2009年度の河川技術部門の課題とし

て「XバンドMPレーダ等の観測情報の活用に関する技術研究開発」（研究期間：2009年度～2012年度）を設定し、XバンドMPレーダの観測技術やXRAIN雨量情報を活用した降雨・洪水予測技術の高度化を図ることとし、5つの研究グループの研究テーマを採択している。各研究グループの研究内容は、レーダ雨量観測技術、降雨予測技術の高度化、水災害予測技術の高度化、避難情報等への活用に関する研究に整理され、全体としてXRAINの利用の高度化に資する研究となっている。本節では、降雨予測技術、水災害予測技術の高度化に関する研究を取り上げ、レーダ雨量情報を活用した降雨・洪水予測技術の動向について概説する。

(1) 降雨予測技術の高度化

XRAINの3次元観測データを用いて、上空で降雨に先行して発生・発達する豪雨のタマゴを検知、追跡し、さらに豪雨のタマゴ内の渦度をドップラー風速から解析することで発達の有無を判定する手法の開発と、これらを自動的に行う危険度予知システムのプロトタイプの構築が、京都大学グループ（代表：中北教授）により行われている¹⁴⁾。この技術は、数分先の豪雨の発生の危険性を定性的に予測する技術で、予測リードタイムは短いものの確度の高い予測が可能であり、都市中小河川のような降雨に対する河川水位の応答が早い流域におけるアラート情報のトリガーとしての活用が期待される。また、同グループによりXRAINの観測情報を利用して個々の降水セルを識別、追跡し、識別した降水セル毎の発達、衰弱を踏まえ降雨予測を行う降雨セル追跡手法の開発が行われ、この手法により従来の運動学的手法による予測よりも予測精度が改善されている¹⁵⁾。この技術は数分先から1時間程度先までの降雨を定量的に予測する技術であり、洪水予測等への活用が期待される。

また、名古屋大学グループ（代表：坪木教授）では、XRAINの観測情報を物理気象モデルに同化する技術を開発するとともに、XRAINの観測情報を同化した予測計算の自動実行システムを構築し、同化、非同化による日々の天気予報実験が行われている。予報実験の結果、非同化実験では再現できなかった局地的豪雨を同化実験により再現することに成功している¹⁶⁾。また、予報実験の結果を地上雨量と比較すると、XRAINの観測データの同化により豪雨時の予測精度が改善されていることが示されている。この技術は1～3時間程度先までの降雨を定量的に予測する技術であり、洪水予測等への活用が期待される。

上記の降雨予測技術は、レーダ雨量の高精度化、時空間分解能の詳細化により実現可能となった技術である。

(2) 水災害予測技術の高度化

京都大学グループでは、様々な降雨パターンを用いて物理的な水位予測モデルによる事前計算を行い、その結

果を用いて統計的な整理をしたテーブルを事前に作成し、XRAIN雨量情報と作成したテーブルの対比により河川水位を予測することで、瞬時に河川水位を予測する手法の開発が行われている¹⁷⁾。また、地表面流出、下水管路流れ、氾濫を物理的に一体として扱った浸水予測モデルを用いて、降雨と浸水のパターン分類を行い、これを組み込んだ統計モデルにより瞬時の浸水予測を可能とする手法の開発も行われている¹⁸⁾。この他に、降雨予測、河川水位予測、浸水予測といった各予測技術の組合せを総合的に精度評価し、親水公園における避難指示の早期化、地下貯留施設の運用の効率化等の可能性を示し、利用用途に応じた予測手法の総合化を行っている¹⁹⁾。

上記の技術は、レーダ雨量の高精度化、時空間分解能の詳細化により、一定精度での予測が可能となっており、レーダ雨量情報の高度化を活用した技術開発である。

5. 降雨・洪水予測技術の高度化に向けて

先に述べたとおり、洪水予測の精度向上には、降雨予測情報の精度改善、洪水予測モデルの再現性向上の2つが主な課題となる。降雨予測情報については、レーダ雨量の高度化並びにそれを活用した降雨予測技術の研究開発により予測精度の改善が図られつつある。洪水予測モデルについては、必要に応じて河川計画策定・評価に用いるモデルから独立して、予測精度の向上に着目して、分布型流出モデル等の別のモデルの導入やデータ同化技術の高度化研究が進められているところであり、今後、再現性の向上が期待されるところであるが、ここで洪水予測モデルの再現性の確保に関して整理し、今後、取り組むべき課題を考察する。

(1) 洪水予測モデルの再現性確保

a) モデル構築、パラメータ設定による再現性確保

洪水予測モデルは、流域の流出特性を踏まえ、降雨事例に依存しないモデル構造であること、フィードバック等の対象とされない（静的）モデルパラメータが適切に設定されていることが重要である。モデル構造については、物理的な流出過程を表現する分布型流出モデルを用いることが有効な方法の一つであり、静的モデルパラメータの設定については、降雨状況を正確に反映した雨量データと、精度の高い流量観測データや観測水位から信頼性の高い水位流量換算を介した流量データを用いることが重要となる。

b) 予測開始時点における計算条件による再現性確保

洪水予測の予測開始時点においてモデル状態量やフィードバック等の対象となる（動的）モデルパラメータが、適切に算定されていることが重要である。モデル状態量の算定、動的モデルパラメータの同定については、降雨状況を正確に反映した雨量データを用いること、精度の高い水位・流量データを用いることが重要となる。

c) 洪水予測モデルの再現性検証と改善

導入した洪水予測システムが必ずしも十分な精度を有していない場合もあり、運用と並行して、モデルの再現性を検証し、改善を進めて行く必要がある。再現性の検証やモデルの改善点を抽出する上で、入力データである実績雨量の観測誤差、計算結果を検証するための流量データの誤差（観測誤差、水位流量換算の誤差）を把握することは重要であり、また、再現性の検証とモデルの改善を効果的に行い、実務に供するモデルへと発展させるために、精度の高い雨量、流量データを用いることが重要である。

(2) 取り組むべき課題の考察

洪水予測の実用性を向上させる上で、雨量データと流量データの観測精度の向上の重要性は大きい。雨量データについては、レーダ雨量情報の高精度化が図られ、洪水予測に供する観測体制が構築されつつある。

流量データについては、ADCP、電波流速計、CCTV画像解析等による流量観測の高精度化の取り組みが進められており、その成果に期待するところである²¹⁾。今後は、洪水予測用途として適切な位置での流量データを連続的かつリアルタイムに入手可能な技術の開発が課題となる。また、洪水予測では、洪水予測モデルで算出された流量を水位換算し、河川水位として結果を得ることから、水位流量換算の高精度化技術の開発が課題となる。

先に述べたアドホック水位計は設置要件の制約が少ないため、洪水予測用途として必要な場所への設置や、安価であるため縦断的に多点の水位観測が比較的容易に実現可能である。また、水面勾配を介することで水位流量関係の二価性を一価性の関係として扱い、二価性に伴う水位流量換算の誤差の低減の可能性が示されている²²⁾。アドホック水位計測による多点水位観測から水面勾配を観測し、水面勾配を介した流量算出により、上記の洪水予測に資する流量データの高度化の可能性が考えられる。

参考文献

- 1) 環境省：IPCC第4次評価報告書第2作業部会，2007。
- 2) 椿涼太，小林健一郎，内藤正彦，谷口丞：洪水予測技術の現状と課題について，河川技術論文集，第19巻，pp.1-6, 2013。
- 3) 下山泰志，飯田繁，河瀬和重，松本浩明：50mメッシュ標高データの精度検証に関する研究，国土地理院時報，No.84，pp.64-72, 1995。
- 4) 小林晶：LPデータを活用した河川の安全度評価，土木技術，Vol.69, No.2, pp.44-46, 2014。
- 5) 深見親雄，吉村英司，黒田尚吾，井上靖生：FRICSにおける分布型洪水予測モデル検討の方向性と課題，河川情報シンポジウム，7, pp.1-7, 2010。
- 6) 河川情報センター：レーダ雨量計全国合成システム運用監視指針（案）
- 7) 川崎将生，土屋修一：ゲリラ豪雨を図る-国土交通省XRAIN-，土木技術，Vol.69, No.2, pp.40-43, 2014。
- 8) 大西智宗：分布型洪水予測モデルの流域特性・河道特性による適用性検討，近畿地方整備局研究発表会論文集，調査・計画・設計部門，No.19, 2011。
- 9) 国土交通省：水災害の監視予測の高度化に関する研究，国土技術研究会資料，2009-2011。
- 10) 川岸一成：簡易水位計を用いた綿密な水位観測データの取得について，近畿地方整備局研究発表会論文集，新技術・新工法部門，No.18, 2011。
- 11) 宮田昇平，中島隆信，白石芳樹，島元尚徳：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，pp.313-318, 2013。
- 12) 福岡捷二，渡邊明英，原俊彦，秋山正人：水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算，土木学会論文集，No.761/II-67, pp.45-56, 2004。
- 13) 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，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.67, No.4, pp.I_511-I_516, 2011。
- 14) 中北英一，山邊洋之，山口弘誠：ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究，水工学論文集，第54巻，pp.345-348, 2010。
- 15) 増田有俊，中北英一：Xバンド偏波レーダを用いた降水セルのライフステージ判別手法の開発，土木学会論文集B1(水工学)Vol.70, No.4, I_493-498, 2014。
- 16) 加藤雅也，尾上万里子，篠田太郎，瀬瀬丈晴，稲垣孝一，大東忠保，坪木和久，上田博：平成22年7月15日に可児・八百津周辺で発生した豪雨の解析-雲解像モデルと雷シミュレーションの結果-，日本気象学会2011年度秋季大会講演予稿集P145(pp.392), 2011。
- 17) Seongsim Yoon and Eiichi Nakakita: The development of rain-based urban flood forecasting method for river management practice using X-MP radar observation, Advances in River Engineering, Vol.19, pp.223-228, 2013。
- 18) 木村誠，城戸由能，中北英一：都市河川内水域における短時間局地的豪雨に対応した瞬時浸水予測手法の開発，河川技術論文集，第17巻，pp.455-460, 2011。
- 19) 木村誠，城戸由能，中北英一：降雨予測誤差を定量的に考慮した都市河川内水域における浸水予測手法の構築と検証，河川技術論文集，第18巻，pp.453-458, 2012。
- 20) 佐山敬洋，藤岡奨，越田智喜，三浦裕司，岩見洋一，深見和彦：XバンドMPレーダによる雨量観測の誤差特性とその時空間構造を反映した降雨場生成法，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.70, No.4, PP.I_517-I_522, 2014。
- 21) 国土交通省：水文観測の高度化に向けた技術開発について（水位流量観測体制・技術の検証），国土技術研究会資料，2009-2013。
- 22) 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。

(2014. 4. 3受付)