

大規模水害対策における予測技術の役割

河川研究部長

鳥居 謙一

大規模水害対策における予測技術の役割

河川研究部長 鳥居 謙一

1. はじめに

2011 年の東日本大震災は、防災施設の規模を超過する自然災害への備え（減災）の重要性を提示した。また、近年国内では 2011 年の台風 12 号、新潟・福島豪雨、2012 年九州北部豪雨など豪雨災害が頻発しており、今年も台風 18 号をはじめ各地で豪雨災害が発生している。海外でも異常気象が頻発しており、2012 年にハリケーン・サンディーによる高潮によってニューヨークで災害が発生した。さらに、地球温暖化により異常気象が頻発することが予測されている。こうしたことを背景に大規模水害の発生を想定した検討と準備が緊急の課題である。本講演では、大規模水害への対応を高度化するための技術的課題のうち降雨観測・予測技術や洪水予測技術について現状をレビューするとともに、大規模水害対策における予測技術の役割を論じるものである。

2. 切迫する大規模水害

2. 1 東日本大震災

東北地方太平洋沖地震は、複数の領域を連動させた広範囲の震源域をもつマグニチュード 9.0 のこれまでの想定をはるかに超えた巨大地震であり、これにより巨大な津波が発生した。この地震・津波により死者 15,883 名、行方不明 2,654 名（2013 年 9 月 24 日現在、緊急災害対策本部発表）におよび一度の災害で戦後最大の人命が失われるなど甚大な被害が発生した。東日本大震災は、これまでの我が国の地震・津波対策のあり方とともに、国民の災害のとらえ方に大きな転換を迫った。

まず、想定対象地震・津波の考え方である。日本海溝周辺の地震のこれまでの想定では、我が国の過去数百年間に経験してきた繰り返し発生している M7 程度以上の地震を切迫性の高い地震と考え検討対象とするとともに、数値計算でこれまで記録されている震度と津波高などを再現することのできる確度の高い地震を対象に、次に起きる最大級の地震として想定してきた。その結果、869 年貞観三陸沖地震、1611 年慶長三陸沖地震、1677 年延宝房総沖地震などは各地に被害記録があるものの想定の対象とはされなかった。

次に、防災対策の在り方である。海岸保全施設は計画規模以下の津波に対しては 100% の防災効果を発揮する。しかし、今次津波のように防災施設の規模を大きく上回る津波に対しては、多くの海岸保全施設が被災し防災機能を喪失している。このことは、海岸保全施設等に過度に依存した防災対策には限界があることを露呈した。

こうしたことを踏まえて、中央防災会議（2011）¹⁾ では、今後の想定地震・津波の考え方として「あらゆる可能性を考慮した最大クラスの巨大な地震・津波を検討すべきである」としている。このことは、従来よりも低頻度の地震・津波までを想定することになる。

さらに、最大クラスの津波に対応した海岸保全施設等を整備することは費用、環境、利用の面で現実的ではない場合も発生することが想定され、「想定地震・津波に基づき必要と

なる施設整備が現実的に困難となることも見込まれる」ことになる。このため、防災対策において最大クラスの津波に対しては、住民等の生命を守ることを最優先として、住民等の避難を軸に土地利用、避難施設、防災施設を組み合わせ、被害を最小化する減災対策が中心となる。

すなわち、防災対策の対象とする外力を、施設規模から施設規模を超過する減災規模へ拡張する必要性を示している。このためには、超過外力（施設の規模を超過する外力）が特別なものではなく、低頻度ではあるが起こりうる事象であるという認識を国民と共有することが極めて重要である。さらに、施設についても設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造物の技術開発が求められている。

2. 2 ハリケーン・サンディー

ハリケーン・サンディーは、南東カリブ海で発生し 2012 年 10 月 22 日 12:00 Tropical depression、22 日 18 : 00 Tropical storm、24 日 12 : 00 Hurricane（カテゴリー1）となり、25 日 5 : 25 にカテゴリー3 に発達した。その後、25 日 9 : 00 にカテゴリー2、26 日 0 : 00 にカテゴリー1 へ勢力を弱めながら 29 日 21 : 00 熱帯外低気圧（Extratropical）となり、29 日 23 : 30 に中心気圧 945mH、最大風速 70kt(カテゴリー1 相当)でニュージャージーに上陸し、その後急速に衰えて 31 日 18 : 00 には消滅している（図-2.1）。ここでは、米国の National Hurricane Center（2013）²⁾ に基づき概観する。

サンディーにより高潮が発生し、ニューヨークの King Point では MLLW+4.44m, Bergen Point West ReachではMLLW+4.36mに達し、同地域に2011年に高潮を発生させたハリケーン・Ireneの時よりそれぞれ1.33m、0.61m高くなった。また、1920年以降観測されているBatteryではMLLW+4.29mとなり、既往最高より1.33m、ハリケーンIreneの時よりも1.39m高くなった。

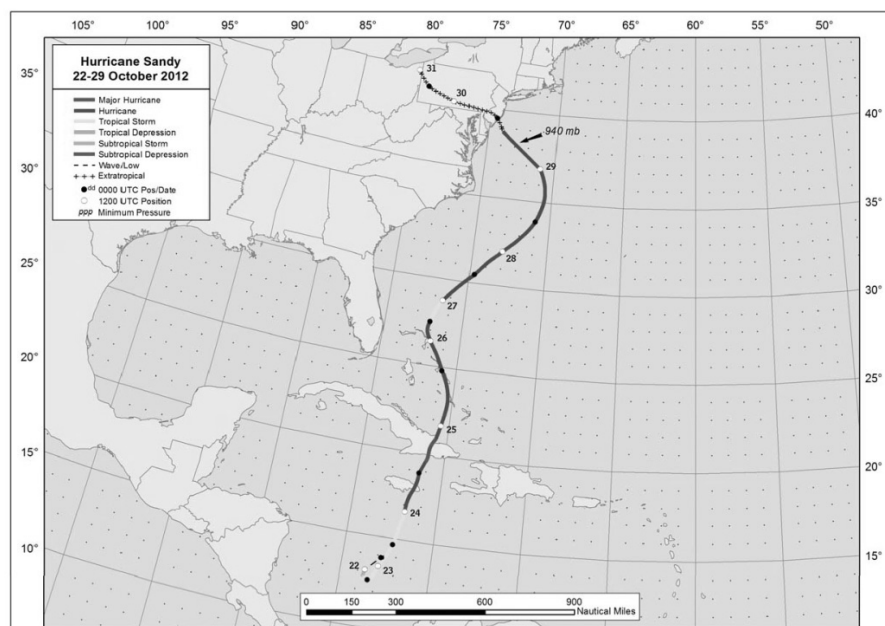


図-2.1 ハリケーン・サンディーの経路²⁾

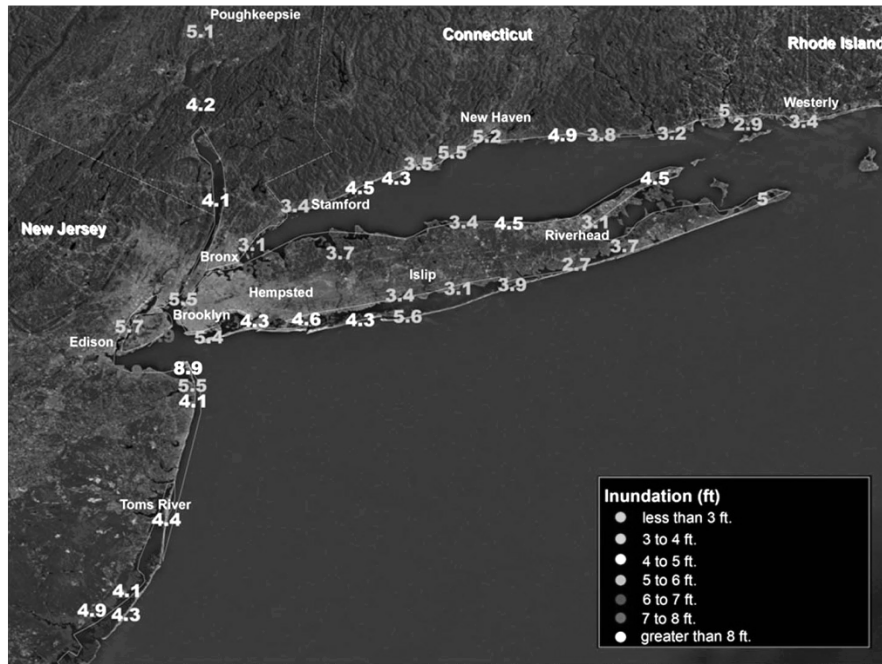


図-2.2 推定される浸水深（USGS の痕跡調査及び NOS の潮位計）²⁾

この高潮により各地で浸水が発生し、スタテン島およびマンハッタンで約120～270cm、ブルックリン・クイーンズで約90～180cm、ロングアイランドで約90～180cm、ハドソン川河畔で約90～150cmの浸水深さとなった（図-2.2）。

サンディーにより、全米で死者 72 人（南部の州を除けば 1972 年のハリケーンアグネス以来の規模）、交通、電気、ガスなどのライフラインの被害、ニューヨーク証券取引所の閉鎖など社会経済活動に大きなインパクトを与えた。被害総額は 8 兆円規模（1900 年以降ハリケーンカトリーナに次ぐ 2 番目）の被害が見積もられている。

アメリカ国立気象局（NWS）の国立ハリケーンセンター（NHC）が浸水深さ（予測潮位と地盤高さの差）の予測を発表している。27 日 15：00（上陸の約 2 日 9 時間前）にニュージャージー、ニューヨーク、コネティカット沿岸に 122～24cm の浸水予測が発表された。予測浸水深さは、順次引き上げられ 28 日 6：00（上陸の 42 時間前）の時点で 153～30cm、28 日 15：00（上陸の 32 時間前）で 183～33cm となった。この予測結果は、実際の潮位観測結果と比較しても適切であったと NHC では評価している。

ここで、特筆すべきことは NHC のプロダクトである浸水予測は、潮位と地盤高によって算定されている点である。米国においては高潮堤防の建設に消極的であったため、我が国のように防潮堤を考慮する必要がなく、潮位と地盤高の差がおおむね浸水深となるため、シンプルな予測となっている。

ニューヨーク（NY）の想定浸水は、ハリケーンのカテゴリー毎に ZoneA：カテゴリー1、ZoneB：カテゴリー2、ZoneC：カテゴリー3、4 が NY の南を直撃した場合に浸水の可能性のある区域を示している（図-2.3）。ちなみにハリケーンの米国の区分ではカテゴリー5 が最大、日本の「非常に強い台風（最大風速 44-53m/s）」がほぼカテゴリー3（最大風速 49-58m/s）に相当する。今回のサンディーはカテゴリー1 のハリケーン相当であり、浸水

もほぼ ZoneA に相当するものであった。

大西洋北部の気象情報について見てみると、台風情報、注意報、警報の発表を担当する NWS と防災部局が NWS の発表する情報や警報・注意報の内容、情報の継続、変更に関する様々な可能性についての議論が上陸 5 日前に始まっている。NWS は上陸 3 日前に大西洋北部沿岸に、NHC が台風注意報とせずに台風情報としてサンディーの影響を継続的に発表し、気象予報事務所（WFOs）が暴風警報・注意報を発表することを決定し、上陸 60 時間（2.5 日）以上前に WFOs が暴風注意報・警報を発令した。これは、台風注意報を上陸 2～3 日前に発表することになっているが、上陸時にハリケーンから熱帯外低気圧（Extratropical）になる可能性があり、危機管理オペレーションの途中で気象情報が NHC の台風警報から WFOs の暴風警報に変更することによる現場の混乱を回避するための特別な措置であった。

台風の進路予測についてみると、4 つのモデル（European Center for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF), Global Forecast System (GFS)（アンサンブル）, GFS（確定）Atlantic Dynamical Model Consensus (TVCA)）があり、このうち上陸を予測していたモデルは、23 日 0:00（7 日前）時点で 0/4、24 日 0:00（6 日前）時点では 1/4（予測上陸 31 日）、25 日（5 日前）0:00 で 1/4（予測上陸 30 日(的中)）、26 日 0:00（4 日前）時点で 4/4（予測上陸 30 日(的中)）1 モデル、31 日 3 モデル）となっている（図-2.4）。通常、台風注意報は上陸の 2～3 日前に発令されることになっており、26 日 0:00 時点では上陸については確実であるが、上陸予想は 31 日が優勢であり、26 日の注意報の発令にはならなかったものと考えられる。詳細は不明であるが NHC は WFOs が 60 時間以上前に注意報を発令したとしており、遅くとも 27 日 12:00 までには注意報が発令されており、26 日 0:00 から 27 日 12:00 の予測が 30 日の上陸を強く示唆したものと考えられる。また、この注意報が 27 日の NY 州知事の緊急事態宣言の発令のトリガーになり、続く FEMA ナショナルレスポンスセンター設置、大統領緊急事態宣言、避難所開設、ZoneA 避難命令、そして 29 日 7:00 Zero Hour（事前対策を終えて治安部隊を除き待避を始める時刻）を迎えることになる。

同様にアンサンブル予測の状況を見てみると 25 日 0:00（上陸 5 日前）の時点の ECMWF のアンサンブル予測では、多くのメンバーが上陸を示している（図-2.5）。一方、GFS のアンサンブル予測では、多くのメンバーが上陸する可能性を示さずに大西洋へ通過する予測を与えている（図-2.6）。



図-2.3 ニューヨークの浸水想定マップ³⁾

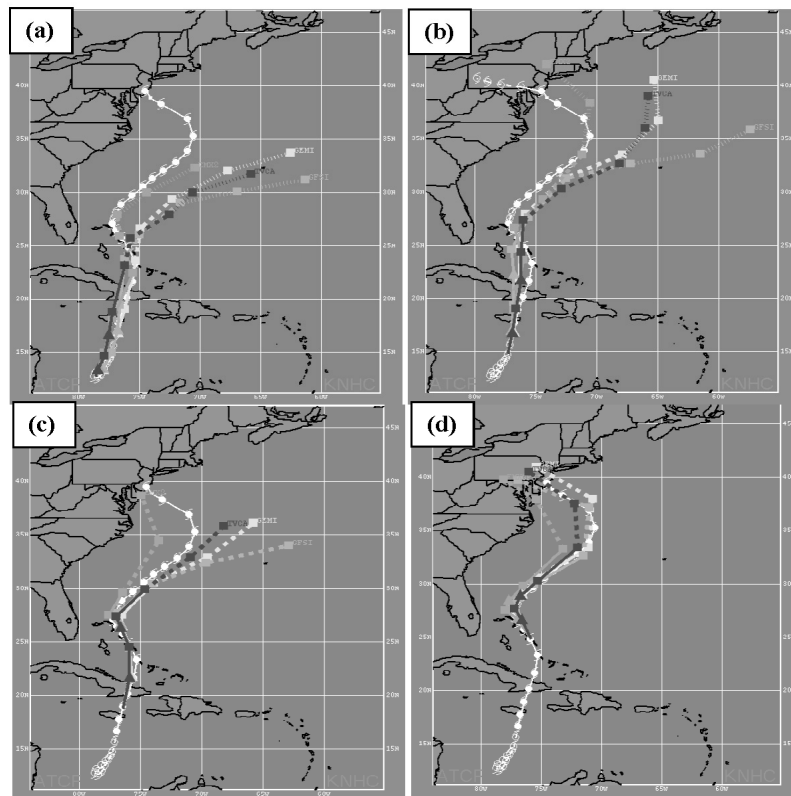


図-2.4 各種台風経路予測モデルの予測結果 白；実際の台風経路²⁾
 (a) 10月23日0:00 (b) 10月24日0:00 (c) 10月25日0:00 (d) 10月26日0:00
 実線：72時間まで 破線：72時間から120時間 点線：120時間から168時間 (a, b のみ)

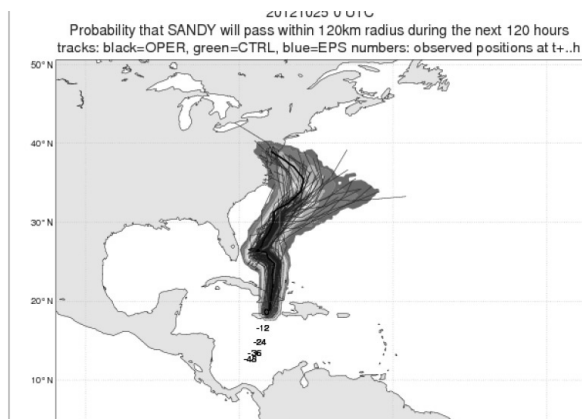


図-2.5 上陸5日前のECMWFのアンサンブル予測結果²⁾

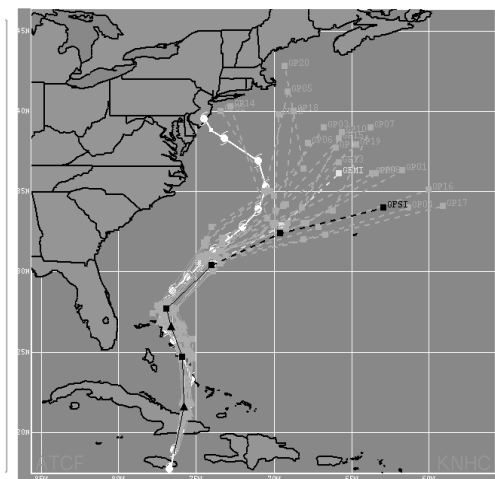


図-2.6 上陸5日前のGFSのアンサンブル予測結果²⁾

2. 3 利根川首都圏広域氾濫

2010年に中央防災会議「大規模水害対策に関する専門調査会」(以下、専門調査会)が、利根川や荒川等の堤防が決壊した場合や東京湾において大規模な高潮が発生した場合における氾濫状況をシミュレーションにより把握するとともに、氾濫形態の分析や死者数、孤立者数の推定、その他の被害様相の想定等をおこなった。また、被害想定結果や既往の大規模水害時の状況等をもとに、大規模水害発生時の対応を中心に首都圏において講ずべき

大規模水害対策等について検討がおこなわれた。専門調査会の利根川氾濫想定（ポンプ運転なし、燃料補給なし、水門操作なし、排水ポンプ車なし、洪水規模 1/200）のうち利根川右岸 136.0km 地点の埼玉県加須市（旧大利根町）弥兵衛地先を堤防決壊箇所と想定した首都圏広域氾濫では、浸水面積が約 530km²、浸水区域内人口が約 230 万人と想定されている。また、避難率が 0% の場合には死者数約 2,600 人と想定している（図-2.7）。さらに、孤立者ははん濫流の流下とともに孤立者数およびその分布が変化し、決壊 1 日後に約 30km 下流の越谷市まで流下し孤立者が約 58 万人発生し、決壊 2 日後には東京都区部にまで拡大し最大約 110 万人となっている（図-2.8）。

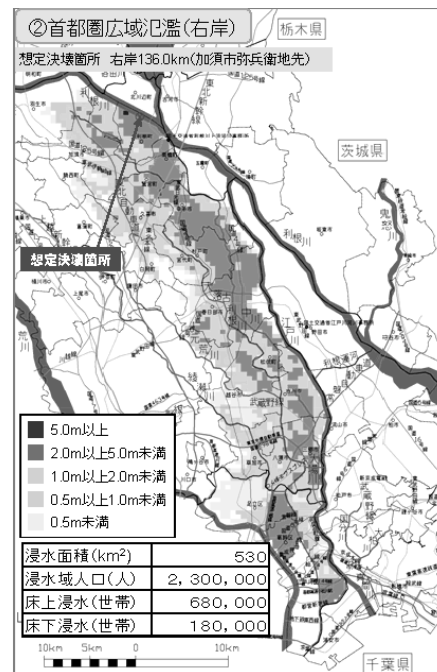


図-2.7 想定浸水深
(利根川首都圏広域氾濫) ⁴⁾

また、要避難者想定においては、現在の予測技術では、河川堤防の決壊箇所を事前に予測することは困難であるため、可能性のある全ての堤防決壊パターンによる浸水想定区域を検討し、それらを重ね合わせた地域の住民等を避難対象者とする必要があるとしている。この結果、利根川、江戸川、荒川の堤防決壊に伴う浸水想定区域を検討した全てのパターンを重ね合わせた結果から、避難の対象とすべき条件を、「居住空間が水没」すること（条件 1）、「浸水継続時間 3 日以上」であること（条件 2）とした場合、要避難者数は約 421 万人と想定され、膨大な要避難者が存在すること指摘している。

また、専門調査会は以下の通り報告している。

「洪水や高潮による大規模浸水の特徴として、河川氾濫による大規模水害時には、堤防決壊前から雨量や河川水位等の情報により氾濫の危険性を予測することができる。

また、堤防の決壊後においても、上流域の決壊箇所近傍から下流域まで長時間かけて浸水域が拡大する。高潮災害の場合においても、台風の規模や進路の予報等により被害の発生を予測することができる。そのため、大規模水害時に想定される人的被害を軽減するた

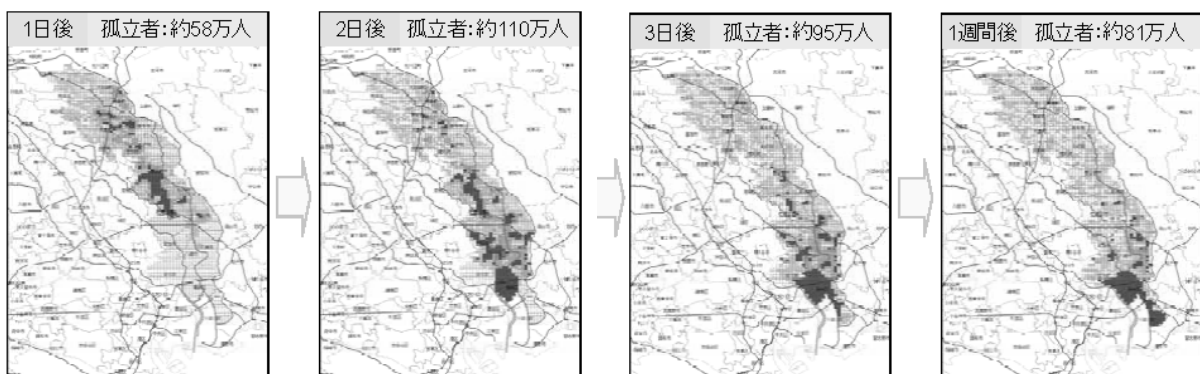


図-2.8 想定孤立者（利根川首都圏広域氾濫型、ポンプ運転無、燃料補給無、水門操作無、ポンプ車無、避難率 0%、洪水規模 1/200） ⁴⁾ 赤：孤立者 1,500 人以上 橙：孤立者 500 人以上 1,500 人以下 黄：孤立者 100 人以上 500 人以下

めには、雨量、河川水位、台風の規模や進路予報等の情報から氾濫の危険性についての的確に予測を行うとともに、浸水被害が発生する前に、浸水が想定される地域の住民や滞在者を安全な場所に避難させることが重要となる。」中央防災会議（2010）⁴⁾

一方、次のようにも報告している。

「避難勧告・指示等は、出来る限り早期に発令することが望ましい。しかし、堤防決壊等の事態は、早期に予測判断する程、予測の精度は低くなる。一方、広域避難を実施する場合の社会的なコストは大きく、そのことが早期の避難勧告・指示等の判断に支障を及ぼす可能性がある。」中央防災会議（2010）⁴⁾

この点が、河川氾濫による浸水予測とサンディーの高潮による浸水予測と大きく異なる点である。河川氾濫を予測するためには、決壊をモデル化することがすることが不可欠であるが、このためには河川内の流下する流量を精度よく予測する必要がある、さらに水位を精度よく予測する必要がある、さらに決壊を精度よく予測する必要がある。

しかし、洪水時の水位一つをとっても、自然公物である河川にあっては砂州の形成や植生の繁茂など河道の状況が常に変化しており、さらに洪水時には河床の変動などどのような変化が発生するか予測することは極めて困難であり、精度よく水位を予測することは困難と言わざるを得ない。さらに、破堤を予測することは、土堤を原則している河川堤防においては、その築造の歴史から断面的、また基礎地盤から縦断的に極めて不均一であり、これを完全に把握することも現実的に不可能であり、決壊箇所を事前予測することは不可能である。

このため、予測精度を向上させることが可能な分野において最大限その精度向上に努めるとともに、現時点においては予測することに限界があることを前提にした判断が必要である。

3. 降雨観測技術の現状

近年、日本の各地で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が多発し、それらに起因する浸水被害や水難事故が発生している。こうした豪雨による災害対策のために豪雨の状況を的確に把握することは重要であり、面的な雨量情報をリアルタイムに得ることができるレーダの有効性は高い。国土交通省水管理・国土保全局は、1975年に赤城山にCバンドの波長帯を利用するレーダ雨量計の運用を開始し、これまでに26基のレーダ雨量計を日本全国に設置し、現業運用を行っている。このレーダ雨量計は、電波の反射強度を受信するのみの単偏波レーダであるため、雨滴群からの反射電力から計算される反射因子(Z)から降雨強度(R)を推定するZ-R関係式を降雨量推定の方法として用いている。Z-R関係式による降雨量推定は、ハードウェア、降雨タイプ、降雨減衰による誤差といった様々な誤差の影響を受ける。そのため、国土交通省ではレーダ雨量を地上雨量計でリアルタイム補正することで観測精度の定量性を確保している。

単偏波レーダに替わる気象レーダとして二重偏波レーダの研究開発が1980年代に土木研究所を中心に開始された。二重偏波レーダは、2種類の偏波面を有した電波を発射しそれぞれの強度、位相情報を受信することが可能なレーダである。土木研究所は、水平偏波

と垂直偏波の反射因子差(Zdr)から降雨強度を推定する Zdr 法を採用する二重偏波レーダを開発し、1994年に釈迦岳レーダ雨量計が二重偏波レーダ化され、その後、八本木、国見山レーダ雨量計が二重偏波レーダ化されている。

その後、2000年代には、Cバンドレーダによる2種類の偏波間の位相差の距離の変化率(Kdp)から降雨量を推定するKdp法の研究開発が京都大学・情報通信機構により行われ、これらの研究成果を受け、釈迦岳レーダ、城ヶ森レーダはKdp法を採用するCバンド二重偏波レーダに更新された。また、時期を同じくして、Xバンドの波長帯を利用するレーダによるKdp法の研究開発が防災科学技術研究所により行われた。

平成20年7月の都賀川（神戸市）、浅野川（金沢市）において、従来型の単偏波Cバンドレーダでは捉えきれない集中豪雨や局地的な大雨により、水難事故や河川氾濫が発生し、降雨監視体制の高度化が求められた。防災科学技術研究所の研究成果より、Kdp法を用いることで地上雨量計によりレーダ雨量を補正しなくとも、精度の高い降雨観測が可能であることが示され、観測直後に雨量情報を配信、短い時間間隔での観測が可能となること、Xバンドのレーダを用いることで、Cバンドよりも面的に詳細な観測が可能となることから、国土交通省水管理・国土保全局では、Xバンド二重偏波（MP）レーダを設置し、ゲリラ豪雨に対応した豪雨監視体制（XRAIN：X-band polarimetric (multi parameter) RAdar Information Network）の構築を開始した。

3. 1 XRAIN

XRAINは、人口、資産が集中している政令指定都市や、近年、甚大な水害、土砂災害等が発生した地域をカバーするように整備を進め、2013年9月現在、35台のXバンドMPレーダで構成されるレーダネットワークとなっている（図-3.1）。

XRAINで観測された雨量情報は、空間解像度250mメッシュ、更新間隔1分、配信遅れ1分程度で、レーダ画像として配信しており、既存のレーダ雨量情報と比較して、16倍の空間解像度、5倍の時間分解能、1/10に短縮された配信遅れ時間となっている（図-3.2）。

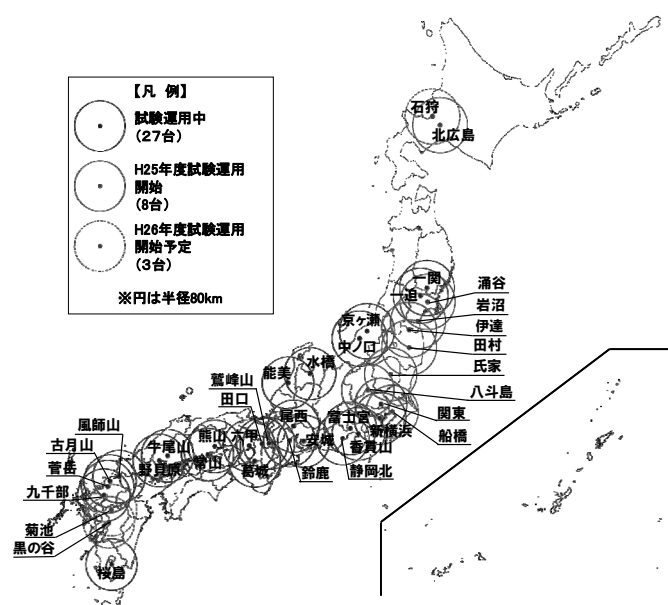


図-3.1 XRAINの整備状況

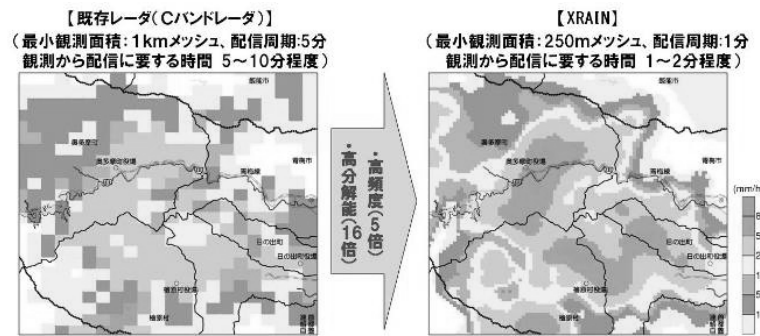


図-3.2 既存のレーダ雨量情報と XRAIN 雨量情報の比較

図-3.3 は、2012 年 8 月 12 日に岡山地域で局地的な豪雨を XRAIN で観測した結果である。幅 10km 程度の帯状の雨域を捉えるとともに、雨域内の降雨分布を詳細に捉えられていることが確認できる。また、図-3.4 は、当該事例の日応寺アメダスの地上雨量計で観測した雨量及び日応寺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ピークが過小であるのに対して、XRAIN では、雨の降り始め、ピーク、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、雨の量及び時間的変化を精度良く観測できていることが確認できる。

このほか、これまでに観測された降雨事例について観測精度を検証した結果、いずれの地域においても地上雨量と良く対応した雨量が XRAIN で観測されており、精度良く降雨を観測できていることを確認している。特に既存のレーダでは難しかった時間的に降雨量が急激に変化する降雨においても精度良く観測ができていることが確認されている。

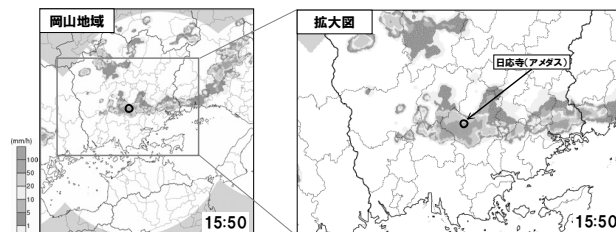


図-3.3 XRAIN による局地的豪雨の観測事例（岡山地域：2012 年 8 月 12 日）

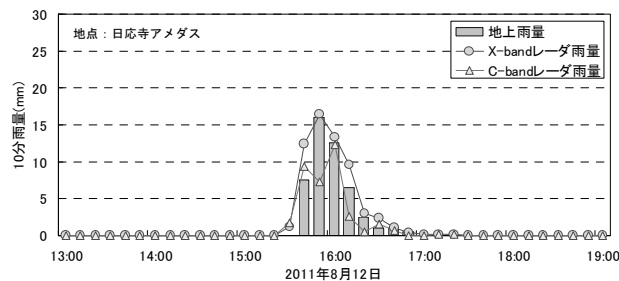


図-3.4 地上雨量、XRAIN、C バンドレーダ雨量の時系列（場所：日応寺アメダス地点）

3. 2 XRAIN の利活用

国土交通省では XRAIN によるリアルタイムかつ詳細な雨量情報を、河川管理や防災・避難活動へ活用する取組みを進めており、洪水予測の高度化(図-3.5)や、強雨時の携帯電

話端末へのアラートメール配信(図-3.6)などに取り組んでいる。H23 台風 12 号では、大雨に伴う土砂崩れにより発生した河道閉塞の閉塞箇所に雨量計を設置するまでの間の代替の雨量情報として河道閉塞の決壊監視に利用されている。また、決壊監視を支援するために、集水域内の累積雨量に応じてアラートメールを本省、近畿地整の防災担当、TEC-FORCE メンバーへ配信されている。H23 新潟福島豪雨においては、信濃川下流沿川の自治体職員は、XRAIN 雨量情報を土嚢積み等の水防活動の指示、避難勧告・指示、交通規制の実施・継続・解除、パトロール及び体制の準備等の参考情報に利用したことが報告されている。

また、XRAIN の数値データ等は、地方自治体や民間へ提供しており、京阪電鉄では列車の運転保安の確保、東日本放送では XRAIN 画像情報の提供、東京消防庁では警戒地域の早期把握や水防活動の判断支援、富山空港では航空機の運航補助への活用(図-3.7)や、民間によるスマートフォン向けアプリ等の開発(図-3.8)、地方自治体の電子地図サービス(図-3.9)への利用といった利活用が進められている。

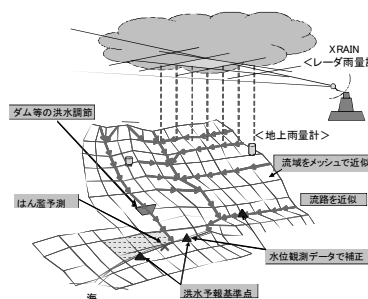


図-3.5 XRAIN を取り込んだ洪水予測モデル

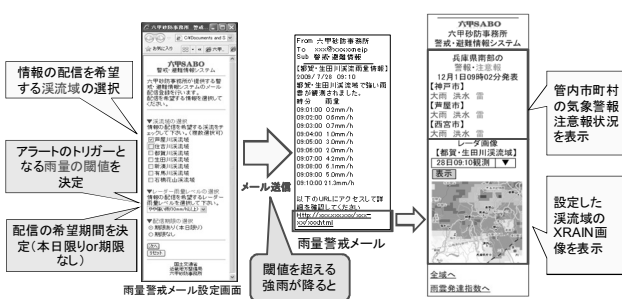


図-3.6 携帯端末による情報提供（六甲砂防事務所の例）

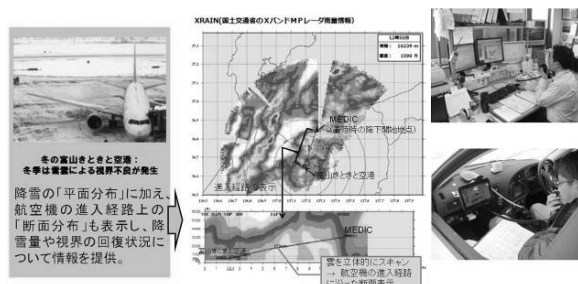


図-3.7 航空機の運航補助に活用（富山県：富山きときと空港）



図-3.8 スマートフォン向けのアプリ等の開発



図-3.9 電子地図サービスへの XRAIN の重ね合わせ（江戸川区・（独）防災科学技術研究所）

3. 3 XRAIN の技術開発

XRAIN は、気象庁や大学、研究機関、民間企業等において、観測技術、降雨予測、洪水予測、情報提供技術等に関する技術開発が行われている。国土交通省では、河川技術研究開発制度にて採択された 5 つの研究グループに委託研究を行い、XRAIN の観測情報の利活用、技術開発を進めてきた(表-3.1)。また、産学官からなる技術開発コンソーシアムを設置し、XRAIN を利用した技術開発とその成果の共有を図ってきた。コンソーシアムには、40 を超える機関が参加し、技術開発を効果的に進めるため、レーダ雨量の数値データを配信している。

表-3.1 研究グループとテーマ

研究グループ	テーマ名
名古屋大学地球水循環研究センター 教授 坪木和久	XバンドMPレーダと雲解像モデルによる短時間・極短時間量的降水予測法の開発
京都大学防災研究所教授 中北英一 (代理発表: 特定助教 山口弘誠)	ゲリラ豪雨予測手法の開発と豪雨・流出・氾濫を一体とした都市スケールにおける流域災害予測手法の開発
国土技術政策総合研究所 河川研究部流域管理研究官/前(独)土木研究所ICHARM上席研究員 深見和彦	XバンドMPレーダの効果的実用へ向けての降雨観測・予測とCバンドレーダとの連携活用に関する技術研究開発
(株)建設技術研究所 東京本社河川部長 藤原直樹	MPレーダデータによる定量的降雨量推定とユーザの立場からの避難支援システム開発に関する研究
鹿児島大学 地域防災教育研究センター特任教授/前(独)防災科学技術研究所 観測・予測研究領域長 眞木雅之	MPレーダネットワークによる雨と風の3次元分布推定手法の開発

国土技術政策総合研究所においては、XRAIN の構築、運用に関する検討や観測精度向上等の検討を行い、XRAIN の実用化へ寄与してきたところであり、河川技術開発公募制度で開発された技術を XRAIN に実装し、さらなる精度向上を図るために検討を進めているところである。

3. 4 C バンド MP レーダ

XRAIN は、そのレーダの特性から降雨による電波の減衰(降雨減衰)が大きく、強雨域の後方で電波が完全に消散し、観測不能領域となる場合がある。また、観測範囲が既存の C バンドレーダと比較して狭いため、全国をカバーすることは難しい。そこで、国土技術政策総合研究所では、XRAIN の降雨減衰、観測範囲に関する課題を克服するために降雨減衰に強く、観測範囲の広い C バンド MP レーダとの連携技術の検討を進めているところである。C バンド MP レーダの雨量算定手法を検討し、精度検証を行った結果、XRAIN には精度が劣るものの、地上雨量計による補正を必要としない精度を有する段階となっている(図-3.10)。これらの結果より、今後、更新となる C バンドレーダは C バンド MP レーダへ更新される予定となっている。

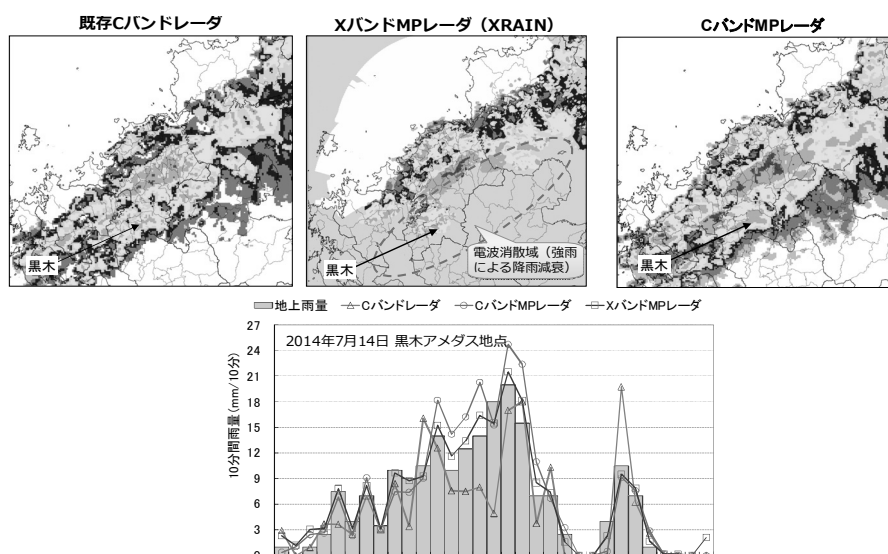


図-3.10 既存 C バンドレーダ(補正あり)、XRAIN(補正なし)、C バンド MP レーダ(補正なし)の比較

3. 5 今後について

国土交通省では、平成 26 年度中の配信開始を目標に、九州熊本地域に 2 基、北海道札幌周辺地域に 1 基のレーダの整備を進めており、XRAIN の更なる観測体制の強化を図る予定となっている。また、XRAIN は、平成 22 年 7 月より試験運用を開始し、雨量情報の配信を行ってきたところであるが、一定の技術的知見の蓄積と精度の確認が取れたため、H25 年度中には、本運用に移行する予定となっている。今後とも、雨量算定方法や運用方法の改善等、さらなる観測精度の向上に取り組むとともに、気象庁、大学、研究機関、民間企業等と連携し、観測データの利活用促進を進めて行く予定となっている。

また、XRAIN による雨量観測の数値データについては、社会実験等の取り組みにより試験的に提供を行ってきたが、継続的な配信ニーズが高いことから、「河川情報数値データ配信事業」を創設し、XRAIN を始め、水位・雨量等の河川情報の数値データの提供サービスを H25 年度内に開始する予定となっている。

XRAIN により、高精度の降雨量を高解像度で面的に把握することが可能となり、洪水予測全般の精度向上が期待される。特に、ほぼ実時間で降雨を把握することが可能であることから、流出時間の短い小流域での流出予測精度が向上することが期待され、都市内浸水予測や河川公園利用者への警報の発令などへの応用が期待される。一方、大流域においては、電波消散により観測不能区域が発生する可能性があり、C バンドレーダーとの連携が不可欠である。

また、気象分野の研究で XRAIN のデータが活用され、降雨予測技術の高精度化が進んでいる。例えば気象庁では、30 分～1 時間程度先までの降雨予測の高精度化を図るため気象庁レーダと XRAIN を用いた高解像度ナウキャストの研究開発を進めている(図-3.11)

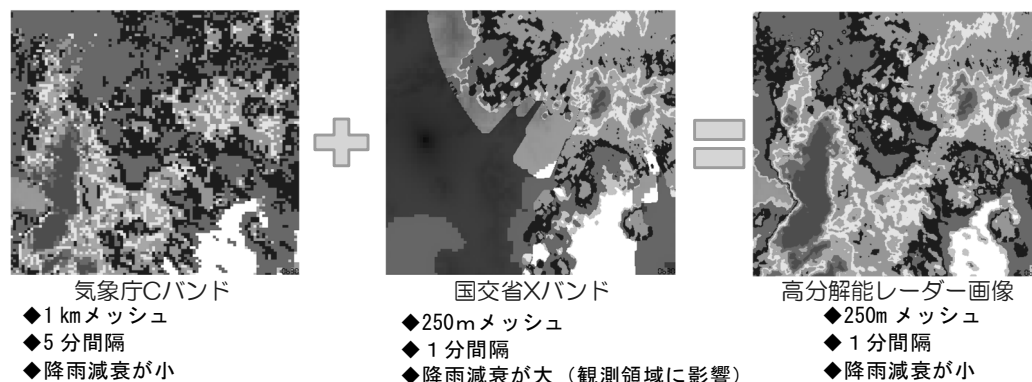


図-3.11 気象庁による高解像度版ナウキャストの開発

4. 短期降雨予測技術の現状

4. 1 気象庁短期予測雨量と予測精度の変遷

洪水時の対策を考えるにあたっては、洪水の要因である短時間の降雨に関する予測情報が重要である。ここでは、気象庁から発表されている短期降雨予測の変遷について記す。表-4.1 は平成 14 年 5 月から平成 19 年 11 月(左)とそれ以降(右)の気象庁短期予測データに関する情報を気象庁 HP 等⁵⁾⁶⁾を参考に、簡単に表にまとめたものである。全球予測モデルである GSM は、平成 14 当初から平成 19 年 11 月までは解像度が約 120km であった。それを RSM により約 20km 程度にダウンスケールした後、MSM を用いてさらに

表-4.1 気象庁短期予測雨量データの変遷

(左：平成 14 年 5 月-平成 19 年 11 月、右：平成 19 年 11 月-平成 25 年 9 月現在)

モデル	H14	H15	H16	H17	H18	H19
(全球) GSM	H14.5 ← ● 計算領域: 全球 静力学モデル ● 解像度: 120km ● 運用回数: 1日2回 ・ 初期時刻: 00UTC: 84時間予報(時間分解能: 6時間) ・ 初期時刻: 12UTC: 96時間予報(時間分解能: 6時間)+192時間予報(時間分解能: 12時間)					H19.11
(日本) RSM	H14.5 ← ● 計算領域: 日本 静力学モデル ● 解像度: 20km ● 運用回数: 1日2回 ・ 初期時刻: 00, 12UTC: 51時間予報(時間分解能: 1時間)					H19.11
(日本) MSM	H14.5 ← ● 計算領域: 日本 非静力学モデル ● 解像度: 10km ● 運用回数: 1日4回 ・ 初期時刻: 00, 06, 12, 18UTC: 18時間予報(時間分解能: 1時間)				H18.3	
(日本) MSM	● 計算領域: 日本 非静力学モデル ● 解像度: 5km ● 運用回数: 1日8回 ・ 初期時刻: 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC: 15時間予報(時間分解能: 1時間) ・ 2007年5月より, 03, 09, 15, 21UTCについては33時間予報に延長(時間分解能: 1時間)				H18.3	H19.11

モデル	H19	H20	H21	H22	H23
(全球) GSM	H19.11 ← ● 計算領域: 全球 静力学モデル ● 解像度: 20km ● 運用回数: 1日4回 ・ 初期時刻: 00, 06, 18UTC: 84時間予報(時間分解能: 1時間) ・ 初期時刻: 12UTC: 84時間予報(時間分解能: 1時間) ・ 192時間予報(時間分解能: 3時間)				運用中
(日本) MSM	H19.11 ← ● 計算領域: 日本 非静力学モデル ● 解像度: 5km ● 運用回数: 1日8回 ・ 初期時刻: 00, 06, 12, 18UTC: 15時間予報(時間分解能: 1時間) ・ 初期時刻: 03, 09, 15, 21UTC: 33時間予報(時間分解能: 1時間)			H21.11	
(日本) MSM	● 計算領域、解像度、運用回数については同上 ● GPS可降水量データの同化を開始			H21.11	運用中

細かい解像度（5km）にダウンスケールを行っていた。平成 19 年 11 月以降は、GSM の解像度が約 20km に上がったため、GSM を直接 MSM へダウンスケールを行うよう運用が変更されている。また、MSM においては平成 21 年 10 月 28 日より、国土地理院が運用する電子基準点の観測データから得られる水蒸気データの利用を開始し、降水予測の精度改善を行っている⁷⁾。このように、気象庁の短期予測雨量については精度向上を目的として日々改善が行われている。

次に、過去および現在運用されている予測雨量の精度を比較するため、平成 19 年 11 月まで運用されていた RSM と平成 21 年 11 月以降運用されている MSM について精度検証を行った事例について紹介する。平成 19 年 11 月まで運用されていた RSM について、洪水調節への利用を想定して全国の 25 ダムを対象として地上雨量と比較した。予測雨量については毎時の雨量が正確に予測されていることが望ましいが、毎時での予測精度が満足ではなかったこととダムの洪水調節においては総雨量が正確に予測されていることが重要であるという観点から RSM の予報対象時間である 51 時間の積算雨量（流域平均）で比較を行った。図-4.1 は早明浦ダム流域における RSM と地上観測雨量の比較（平成 8 年から平成 16 年を対象）であり、RSM は地上雨量との相関が低いことが分かる。さらに、多くのプロットが X 軸または Y 軸上に乗っており、予測の空振りおよび見逃しが多かったことを示している。このことから、事前放流をはじめとして、ダムの洪水調節に利用することは困難であることが伺える。他ダムの結果についても早明浦ダムの結果とほぼ同様であり、地域や季節に応じて精度が大きく異なることはなかった。

図-4.2 は、平成 19 年 11 月以降運用されている MSM について、MSM の予報対象時間である 33 時間の積算雨量をレーダーアメダスと比較したものである。ここでは、奈良県にある池原ダム流域の 2011 年の台風 6、12、15 号を対象として比較を行っている。RSM における比較と異なり、イベント毎の比較（平成 23 年台風 6、12、15 号を対象）であり、かつ前線性降雨と比較して予測精度が高いと考えられる台風のイベントを扱っていることに留意する必要があるが、RSM と地上雨量との相関と比べ、MSM とレーダーアメダスとの相関は高く、気象庁の予測雨量の精度が向上していることが伺える。しかし、降雨のピーク付近において大きいところでは 33 時間積算雨量の誤差が数百 mm 程度ある。その一

方で、ピーク後の予測に関しては、MSM は降り止む時刻やピーク後の雨量を比較的精度よく予測できおり、ダム洪水調節だけでなく河川の流量予測にも役立つ精度を有していることが分かった。(図-4.3)。

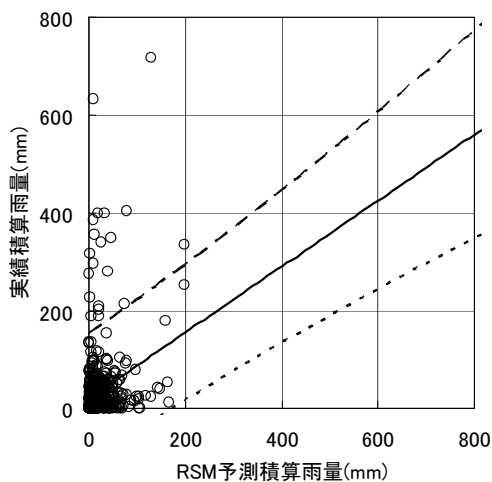


図-4.1 RSM と地上雨量の比較(早明浦ダム流域、51 時間積算雨量)

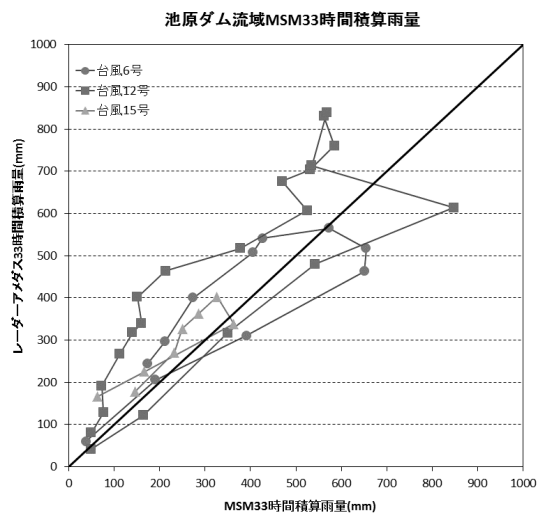
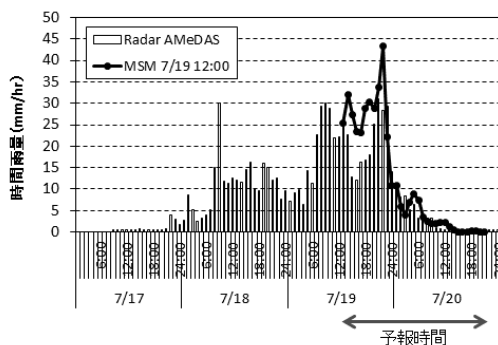
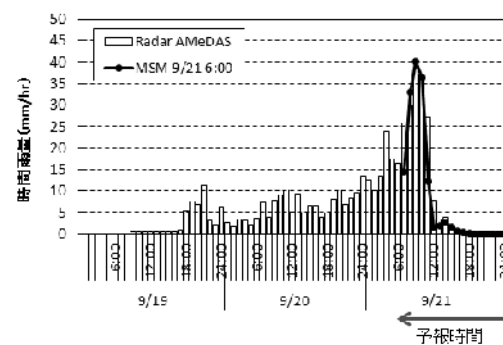


図-4.2 MSM とレーダーアメダスの比較(池原ダム流域、33 時間積算雨量)



(1) 台風 6 号



(2) 台風 15 号

図-4.3 降り終わりにおける MSM とレーダーアメダスの比較(池原ダム流域)

4. 3 アンサンブル予測雨量とダム洪水調節操作への利用

前節までは、MSM 等の「一つの予測結果」のみを示す降雨予測について記したが、ここでは一つの予測結果だけでなく、複数の予測結果から予測の幅を示す「アンサンブル予測」について記す。

近年気象予測の分野では、予測計算の初期値に対してある程度のばらつきを与えて複数の初期値(アンサンブルメンバー)に対して予測計算を実施し、計算された予測の幅を評価するアンサンブル予測に関する取り組み・研究が盛んに行われている。これは、一つの初期値による予測では気象の不確実性故の予測の時間推移評価が難しいため、幅を持って評価するべきであるという近年の気象予測に関する認識を反映している。気象庁の1ヶ月や3ヶ月といった長期予測においてはすでに長期アンサンブル予測が現業化されているものの、豪雨を対象としたような短期予測に関するアンサンブル予測はまだ現業化されていない。しかし、研究は数多く実施されており(例えば8)、今後現業化されることが強く想定される。図-4.4は国総研で実施したアンサンブル予測雨量の計算結果事例(平

成 23 年台風 12 号) である。2012 年 8 月 31 日 9 時の初期値について、20 のアンサンブルメンバーで計算を行い、9 月 3 日 1 時の予測結果である。初期値に応じて様々な計算結果が得られていることが分かる。また、図-4.5 は平成 23 年の台風 15 号について 84 時間先までのアンサンブル予測雨量を計算し、蓮ダムの流域平均雨量について各アンサンブルメンバー、MSM およびレーダー雨量を示したものである。この計算は、実際に洪水調節操作を開始する約 2 日前の初期値に関する予測計算結果である。台風 15 号の規模が小さく短期間の洪水であったということもあるが、洪水調節開始の約 2 日前から洪水の開始から終わりまで精度良く予測することができた。その他の著名豪雨についてもアンサンブル予測雨量の計算を実施しているが、全体として精度良く予測できる事例が多くあることが分かってきている。

4. 4 今後

MSM のような一つの予測だけでは予測精度が十分得られないことを背景として、予測の幅を示すアンサンブル予測雨量が今後現業化される可能性は高いと考えられる。それに備え、アンサンブル予測により得られる予測の幅を河川の防災情報にどのように利活用するかを考える必要がある。

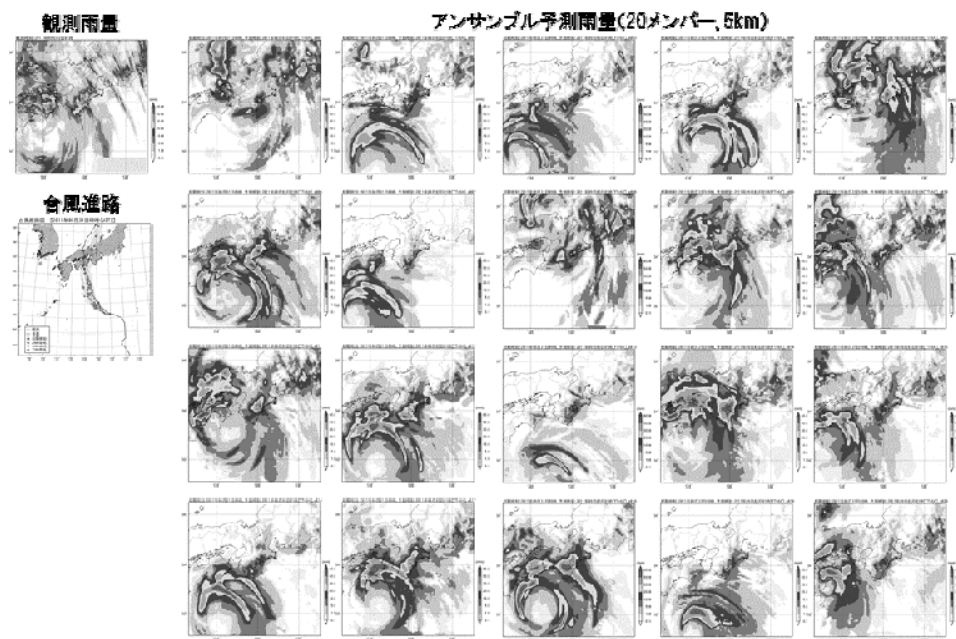


図-4.4 アンサンブル予測結果の事例（初期値：8 月 31 日 9 時初期、84 時間後）

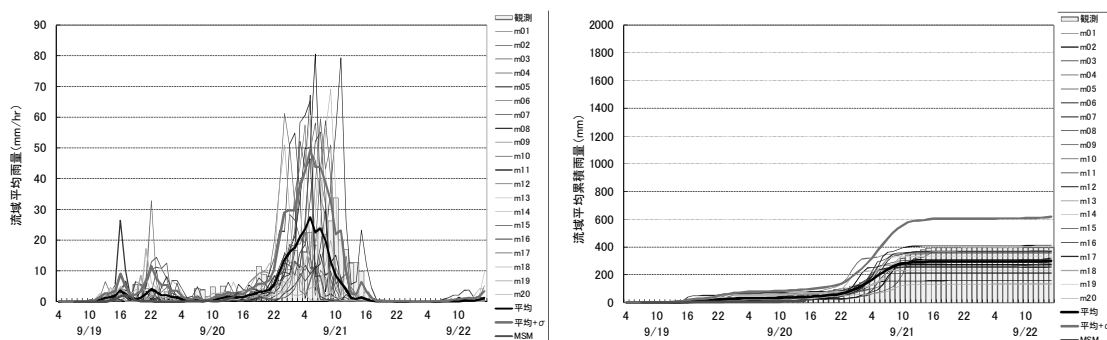


図-4.5 初期時刻：2011 年 9 月 19 日 03 時（洪水調節開始の 2 日前）の 84 時間予測結果（蓮ダムの流域平均雨量）

5. 洪水予測技術の現状

5. 1 洪水予測システムの重要性

頻発する豪雨災害に対して犠牲者ゼロを目指すためには河川管理者や地方公共団体による迅速で的確な対応が必要である。それを旨とし、平成 21 年 4 月より全 8 地方整備局に水災害予報センターをおき、新たに[1]水災害の監視・予測の実施や高度化、[2]水災害の監視・予測、予警報、水位情報等に関する情報収集や情報提供、[3]気候変化による水災害への影響の分析、評価、[4]都道府県河川管理者や水防管理者に対する支援などを実施することとした。この活動の中で、各河川事務所において整備が進められている洪水予測システムによる「高精度な洪水の予測」は、迅速な洪水対応の基礎となる情報であるため極めて重要な課題として位置づけられる。ここでは、現在各河川事務所において導入が進められている洪水予測システムの精度評価を全国横断的に行った事例および、洪水予測技術について現在実施している技術開発について紹介する。

5. 2 河川事務所に導入されている洪水予測システムの現状

国総研では、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 洪水の概略調査を行った。このうちのほとんどが平成 23-24 年に発生したものである。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、ここ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により評価を行った。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、各項目に配点を与え、4 項目の配点を合計し、総合得点を算出した。算出された総合得点の分布を 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-5.1 に示す。A、B と評価される洪水がある一方で、C、D および E と評価される洪水の数も未だ多いことが分かる。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。要因としては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考えられ、これらの要因が結びついた結果であり、システムごとに要因を特定した上で洪水予測システムの精度改善を引き続き実施する必要がある。

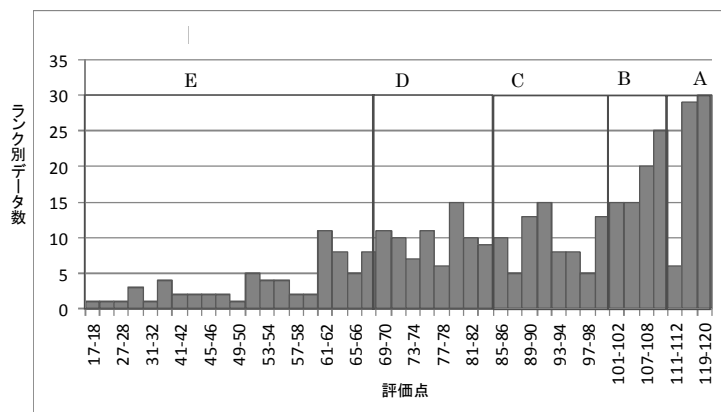


図-5.1 洪水予測システムの総合評価点¹⁰⁾

5. 3 洪水予測に関する技術開発

5. 3. 1 洪水予測に関する技術的課題、開発

前節において、各河川事務所に導入されている洪水予測システムの精度は、未だ十分でないものも多く、引き続いて精度向上に努める必要があることを示した。入出力の不備等のシステムに関する課題も多く存在すると考えられるが、洪水予測システムに導入されている洪水流出計算自体に関して言えば、予測雨量の精度が満足でない、洪水流量観測および観測雨量の誤差が不明、洪水流出モデルの不完全性、高度なフィルタリング手法が導入されていない等の技術的課題が存在する。洪水予測全般に関する最新の技術的なレビューは文献 10) に網羅的に記載されているため、ここでは洪水流出モデルおよびフィルタリングについて河川事務所での普及状況や国総研の取り組みを述べる。

5. 3. 2 洪水流出モデル

流出モデルについては、大学を中心としてレーダー雨量による詳細な時空間観測データや流域地形、土地利用の数値データを導入することでより高い精度の計算を目指した分布型流出モデルの研究が進んでおり（例えば文献 11)）、近年は河川事務所で採用される事例数も増えている。分布型流出モデルは高度ではあるが、パラメータ数が集中型モデルと比較して多い等、その高度さ故に開発者以外が利用することが難しいなど、集中型モデルと比較すると河川事務所に導入するためのハードルがやや高いという側面も存在する。

集中型モデルの代表的なモデルは貯留関数法であり、現在でも多くの河川事務所で貯留関数法が採用されている。これは洪水予測システムの導入が始まった当初は河川計画等で貯留関数法が最も利用されていた実績があったこと、当時の計算資源が限定的であった等を反映していると考えられる。貯留関数法を用いた洪水予測の課題として、飽和雨量 R_{sa} は土壌の湿潤状態を反映したパラメータであるが、数時間後に生じる洪水に対して最適な R_{sa} を事前に決定することが困難であることがあげられる。

国総研では河川砂防技術研究開発公募により、今年度から 2 カ年（H25-26）にわたって室蘭工業大学中津川誠教授に「流域貯留量を考慮した洪水予測手法の汎用性向上の研究」を委託し、集中型モデルに関する開発を行って頂いている。

今回の委託研究においては、洪水用の短期集中型モデルと並行して土壌の湿潤状態を計算できる長期流出モデルを利用する。洪水時には長期流出モデルで計算される土壌の湿潤状態から得られる流出率を短期集中型モデルに与えることにより全ての洪水に対して一定の予測精度の確保を狙うものである。また、北海道、東北、北陸地方においては融雪出水および融雪期の大雨により発生する洪水の予測が難しいことが多くの河川事務所において課題となっており、この委託研究においてはその課題にも取り組むこととしている。

5. 3. 3 フィルタリング手法

5. 3. 1 で述べたように、洪水の予測には技術的に様々な項目について不確実性が存在している。5. 3. 2 で述べたような流出計算の開発は数多く行われているが、現時点でそれぞれの技術的項目について不確実性が把握できていないため、現実のあらゆる洪水に対して予測精度を把握し、精度良く予測することは難しい。

そこで、現実的なアプローチとして現時刻における計算流量値と観測流量値の誤差を、

以降の予測流量にのせるといった「実測調整手法」が多くの河川事務所の洪水予測システムにおいて採られている。このような手法は極めて簡便な手法であり現場での導入が容易である一方で、正式な確率統計理論に則っているわけではなく、任意の時刻について計算流量値と観測流量値の間に一定量のバイアスが発生する洪水以外の洪水については精度良く調整することができない。

この分野においては、モデルの予測値とリアルタイムに得られる観測値から確率的に尤もらしい状態量を確率統計論に基づいて推定するフィルタリングと呼ばれる分野が存在する。古くから様々な分野で利用されている有名な手法として「カルマンフィルタ」が挙げられるが、河川の現場技術者にとっては理論が難しい、または適用条件が厳しすぎて現場で利用することができない等、現場における利用にはほとんど至っておらず、上述したような簡便な手法を採用しているのが現状である。

立川らは、フィルタリングの分野で近年開発された粒子フィルタを、河川分野において積極的に利用している。粒子フィルタはカルマンフィルタと異なり適用条件が広く、洪水予測システム等にも実装が容易である。立川らは、河川の水位シミュレーションを行うダイナミックウェーブ法に粒子フィルタを適用し、ダイナミックウェーブ法によるシミュレーションだけでは観測値を再現性することができないが、観測水位を用いてダイナミックウェーブ法のパラメータをフィルタリングすることにより実際の洪水に対して精度の高い予測計算が行えることを示している¹¹⁾。

河川砂防技術研究開発公募により「洪水予測技術の研究開発」を公募し、京都大学立川康人准教授から提案のあった「粒子フィルタを用いた水位流量曲線および洪水追跡モデルの同定とリアルタイム水位予測」(観測データとシミュレーション手法を粒子フィルタにより組み合わせて、信頼性のある水位流量曲線を作成する技術および、時々刻々の観測水位を用いてモデルパラメータの値や境界条件を粒子フィルタにより逐次推定しながら予測計算を実現する手法・実際の現場への適用に向けた技術開発)を委託した。

5. 4 今後

洪水予測の分野においては、レーダー雨量計による面的な降雨情報の利用が可能となり、計算機の計算速度の向上などにより、分布型モデルの導入が進むとともに、精度向上に向けて長期流出過程を考慮した貯留関数法の改良やフィルタリングによる誤差補正など研究開発が進んでいる。最新の洪水流出モデルや高精度フィルタリング手法を研究レベルにとどめず、積極的に現場展開し、その適用性検証および導入を図ることが重要である。

6. まとめ

本講演では、現実味を高めている大規模水害の実相を明らかにするとともに、大規模水害対策において重要な役割を担う予測技術について現況をレビューし、予測技術の役割について論じたものである。

第2章で東日本大震災(津波)、ハリケーン・サンディー(高潮)、内閣府の大規模水害想定の1つである利根川首都圏広域氾濫(洪水)について、大規模水害の実相を把握するためにレビューを行った。

東日本大震災では、想定を上回る津波により甚大な被害が発生したことや海岸保全施設に過度に依存した防災対策であった教訓を踏まえ、住民等の避難を軸とする「最大クラスの津波高」と海岸保全施設等による防護を中心とする「発生頻度の高い津波」を検討することとなった。このことは、津波に限定した問題ではなく、洪水、高潮についても低頻度災害に対する防災を要請するものであり、洪水対策、高潮対策においても施設の規模を超過した際の対応の検討を迫るものである。

米国のハリケーン・サンディーへの対応は、一方で事前対策の不十分さを指摘する点もあるが、ハリケーン上陸3日前から周到な準備がなされ、その被害を最小限に止められた。これを支えたのが、予測を担当した NWS と危機管理部局との連携であった。

利根川首都圏広域氾濫は、我が国で初めて大規模水害を取り扱った被害想定である。大規模水害においては、避難も大規模となるため、リードタイムをどれだけ確保できるかが極めて重要となる。専門調査会の報告書においても予測に対する期待が込められている。

第3、4、5章で、洪水予測の基本となる降雨観測、降雨予測、水位予測について現状をレビューした。降雨観測は国土交通省が導入した XRAIN により、リアルタイムかつ高精度、高解像度な雨量情報の利用が可能になり、予測精度の向上に大きく寄与するものと期待される。また、気象庁の降雨予測についても、近年その精度向上が進んでおり、さらに短期予測は XRAIN の活用により一層の精度向上が見込まれるとともに、降雨面からの洪水予測態勢の整備が進みつつある。

また、水位予測の分野においても、誤差評価をリアルタイムに取り込む粒子法の導入や長期流出過程の導入による貯留関数モデルの改良により予測精度の向上が見込まれる。さらに、従来の確定論的な予測からアンサンブル降雨予測や粒子法を活用した確率論的な予測が可能となる。

ハリケーン・サンディーでは高潮堤防の整備に消極的であった米国においては、潮位がそのまま堤内地のリスクとなるという事情が危機管理部局の判断を単純化できた側面もある。一方、河川氾濫の場合には水位がそのまま堤内地のリスクとならず、堤防の破堤によりリスクが顕在化するため、決壊を予測することが必要となる。しかし、河川堤防の決壊箇所を事前に予測することが困難であるため、大規模水害の発生を想定して事前に備えるためには、可能性のある決壊パターンをすべて網羅した浸水想定区域を対象とする必要があり⁴⁾、高度な判断を必要とする。

以上のように洪水予測技術は、避難を中心とする大規模水害対策において、リードタイムを稼ぐとともに、タイムラインを設定する上で非常に重要な技術であり、確実に進歩してきている。学術分野でのこうした研究開発の成果を河川管理の実務に実装する上での課題を抽出しつつ改良を加えていくことが重要である。

一方、降雨予測や洪水予測には、モデルとしての不確実さとともに自然公物である河川を対象とすることによる不確実さが伴っており、さらに氾濫予測における決壊のように予測できないことを前提に判断せざるえない要因もある。

危機管理責任者には、こうした状況を踏まえた高度な判断が要求されることになり、実務に予測を活用するためには、危機管理責任者の意思決定を支援する情報が不可欠であり、

予測精度に関する正確な情報の提供とともに、事前に流域のリスク評価や可能な適応策を検討しておくことも必要である。また、予測サイドと意思決定サイドの連携が重要であり、予測 - 意思決定のシミュレーションを事前実施しておくことも重要である。

さらに、避難行動の主体である住民に対して低頻度大規模水害の実相をわかり易く提示するとともに、予測の限界性について予測サイド、意思決定サイドと共通認識を持つことが、円滑な避難行動の実現には不可欠である。

最後に、XRAIN については河川研究部水循環研究室土屋修一研究官、降雨予測、洪水予測については同猪股広典研究官に協力いただいたことを記す。

参考文献

- 1) 中央防災会議 (2011):「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」報告 <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/pdf/tyuukan.pdf>
- 2) National Hurricane Center (2013):Tropical Cyclone Report Hurricane Sandy http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL182012_Sandy.pdf
- 3) WNYC(web):Strom-Surge Flood Zones <http://project.wnyc.org/storm-surge/>
- 4) 中央防災会議 (2010):「大規模水害対策に関する専門調査会」報告 http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/daikibosuigai/pdf/100402_shiryo_2.pdf
- 5) 気象庁:数値予報モデルの種類、
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-4.html>
- 6) 京都大学生存圏研究所:生存圏データベース、グローバル大気観測データ、
<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/glob-atmos/>
- 7) 気象庁、国土地理院:国土地理院電子基準点観測データ (GPS データ) の活用による気象庁メソ数値予報の改善について、平成 21 年 10 月 27 日
- 8) 吉野純、飯田潤士、安田孝志:モデルアンサンブル予報による 2010 年 7 月可児豪雨の予測可能性、水工学論文集、第 55 巻、S475-S480、2011
- 9) Hiromu Seko, Takemasa Miyoshi, Yoshinori Shoji, Kazuo Saito: Data assimilation experiments of precipitable water vapour using the LETKF system: intense rainfall event over Japan 28 July 2008, Tellus, 63A, pp.402-414, 2011
- 10) 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 年 6 月
- 11) 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
- 12) 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