

報告書概要

技術研究開発課題名	X バンド MP レーダ等の観測技術の活用に関する技術開発
技術研究開発テーマ名	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
研究代表者	
氏名	所属・役職
中北 英一	京都大学防災研究所 気象・水象災害研究部門・教授
共同研究者	
氏名	所属・役職
城戸 由能	京都大学防災研究所 気象・水象災害研究部門・准教授
山口 弘誠	京都大学 生存基盤科学研究ユニット・特定研究員
山路 昭彦	財団法人日本気象協会 事業本部防災事業部・部長代理
増田 有俊	財団法人日本気象協会 事業本部防災事業部・主任技師
柴田 研	株式会社日水コン 河川事業部 技術第2部技術第2課・課長
木村 誠	株式会社日水コン 中央研究所・主任研究員
【1】背景・課題	
<p>近年、神戸市の都賀川利用者の事故(2008年7月28日)や東京都の下水道管内作業者の事故(2008年8月5日)をはじめ、局地的な集中豪雨に伴う事故や氾濫被害が頻発しており、その対応が問題となっている。近年の河川や下水道整備の進展によって、これら豪雨による浸水被害の規模やリスクは相対的に減少しているものの、高度に進展した地下利用(地下鉄・地下街・地下室・地下駐車場等の地下施設、電気・ガス・水道・情報等のインフラ設備、アンダーパス等)や資産・交通の集中等、都市が有する構造的な問題より、甚大な被害が生じるリスクは依然として高く、早急な対応が求められている。</p> <p>これに対して、下水道や河川計画に基づき、貯留施設やポンプ場の整備など、施設的な対応(ハード対策)が進められているが、本対応には多くの時間と費用を要する。くわえて、近年は計画を超過する規模の豪雨が頻発していることから、施設的な対応のみでは限界がある。</p> <p>このため、「総合的な豪雨対策の推進について」や「都市における浸水対策の新たな展開」といった、河川・下水道に係わる一連の浸水対策に関する提言においても、今後はソフト対策、すなわち実時間予測(逐次かつ事前の予測)を用いた避難や各戸対策等の自助対策を重要な減災施策として位置づけている。</p> <p>しかしながら、このような局地的な集中豪雨は、空間的・時間的集中性を有しており、被害が生じている都市中小河川域や都市内水域(メソスケール:~10km)では降雨から流出までの時間が極めて短く、レーダで雨域を探知してからでは住民の避難行動や行政の水防活動に必要な準備時間(リードタイム)を確保することが困難となる。くわえて、局所集中豪雨による雨水流出や都市浸水(都市内水氾濫)は、都市が有する複雑な雨水流出・浸水発生機構に起因して、これらを数値モデルによって精細に表現して解析することが求められるが、詳細なモデルを用いた予測手法では計算に時間を要する。このため、減災行動に必要なリードタイムを確保しつつ、信頼しうる精度で都市の河川水位状況や内水氾濫状況を予測・発信することは極めて困難であるのが実状である。</p>	
【2】技術研究開発の目的	
先に述べたように、都市における局所集中豪雨は極めて早く流出するため、都市内水域において減災	

行動に必要なリードタイムを確保したリアルタイム河川水位予測や内水氾濫予測を行うためには、より短時間に河川水位や浸水状況が評価できる手法を開発・適用するとともに、降雨予測情報の活用により所定のリードタイムを確保することが不可欠となる。

一方、現在、国土交通省河川局（現、水管理・国土保全局）では、都市域において偏波レーダ（XバンドMPレーダ）網を整備し、より空間的・時間的に詳細な気象場（降雨・風）の観測が図られている。これをふまえ、本研究では都市河川域、都市内水域（下水道排水域）におけるゲリラ豪雨（都市型集中豪雨）への対応を目的として、XバンドMPレーダによる降雨観測情報を用いたリアルタイム河川水位予測及び内水氾濫予測手法の開発、すなわち「都市中小河川スケールにおける降雨・流出・内水氾濫を一体とした流域災害予測手法の開発」を目指すものとする。

なお、降雨予測手法、河川水位予測手法、都市内水氾濫予測手法の各要素手法は、予測計算の時間的制約にも起因して、運動学的手法や物理学的手法、統計的手法など、降雨機構、雨水流出機構、浸水機構の取り扱いに際して種々のアプローチが想定される。ただし、個別の精度議論は行われているものの、これら各手法の適用性（組合せ方）を取り扱った事例は少なく、降雨・流出予測手法を開発するに際して必要となる予測精度や空間・時間分解能、リードタイムといった目標値は、観測・予測手法や解析環境より規定されているのが実状である。効率的に実用的な予測手法を開発するためには、利用用途に求められる必要要件をふまえ、観測・予測手法全体の精度評価（効果評価）によって、降雨観測・予測、水位予測等の各要素手法（サブモデル）について、必要十分となる開発目標を設定する視点を導入する必要がある。

【3】技術研究開発の内容・成果

以上の目的や背景をふまえ、本研究では以下の項目について、研究・開発を進めた。

(1) 都市中小河川スケールを対象とした以下の各要素技術の開発・精度向上

- ①降雨予測手法
- ②河川水位予測・判定手法
- ③都市浸水予測・判定手法

(2) 利用用途や流域特性に応じた河川水位・内水氾濫予測手法の提案

- ①各要素技術を組み合わせた降雨・流出（水位）・氾濫に係わる一体的な精度評価
- ②一体的な精度評価結果をふまえた各要素技術の組み合わせ方法の提案

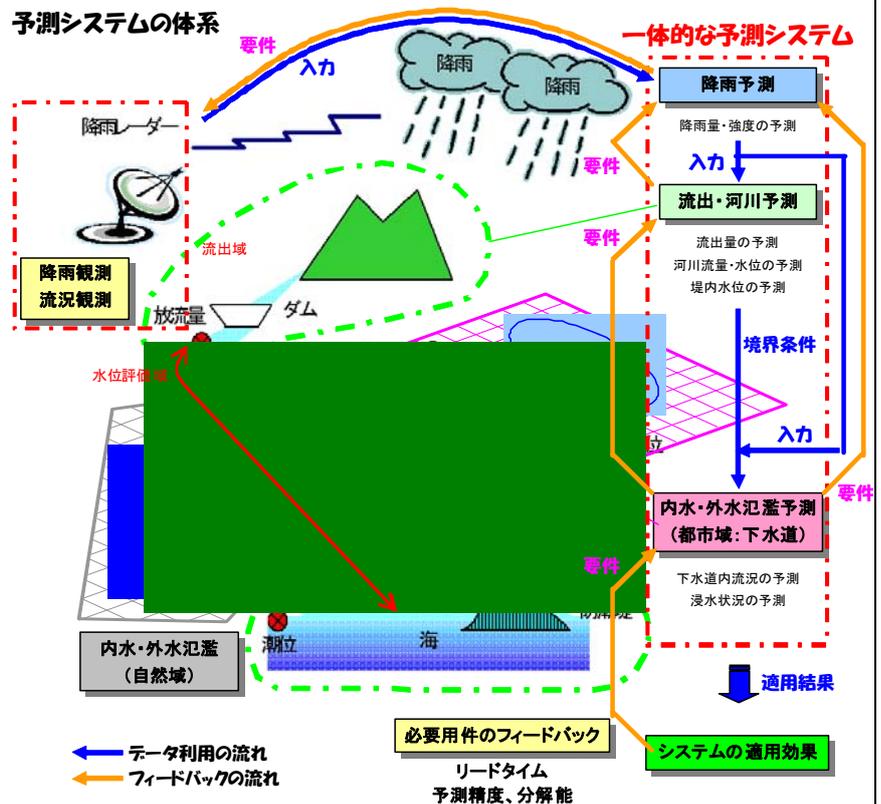


図1 予測システムの体系

(1) 都市中小河川スケールを対象とした以下の各要素技術の開発・精度向上

①降雨予測手法

1) 豪雨の早期探知手法

2008年に発生した神戸市都賀川事故では、5分、10分先予測の難しさを改めて思い知らされ、少なくとも人命は守るという観点から定量的な予測よりも危険かどうかといった定性的な情報でもいち早く予知することで十分な対策をとることができる。そこで、XバンドMPレーダを用いて、豪雨のタマ

ゴの早期探知、降水セル自動追跡、危険性予知、の3つのアプローチから対策手法を開発した。

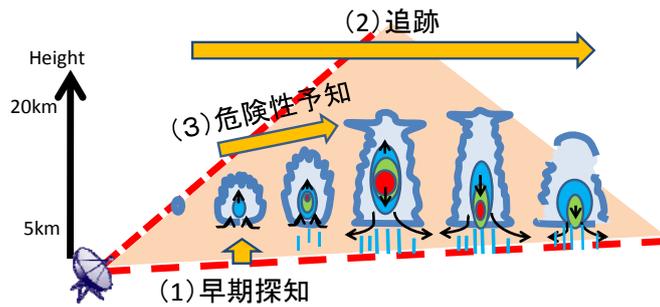


図2 ゲリラ豪雨災害への対策アプローチの概念図

■豪雨のタマゴの早期探知

豪雨をもたらす積乱雲は大気上空で降水を形成し、上昇流によって支えきれなくなったところで地上に大量の降雨をもたらすことから、いち早い探知のためにはXバンドMPレーダで地上観測のみならず上空観測の重要性を説いてきた。近畿地方にある4機のレーダから3次元合成エコー画像を作成し、22の豪雨事例を解析した結果、地上雨量よりも上空にできた豪雨のタマゴ探知の方が約3分ほど早く探知していることがわかった。さらに、強エコー域に着目すると約5分ほど早く探知していることがわかった。この3分、5分という時間が防災上極めて有効な時間であることを示した。

■降水セル自動追跡

XバンドMPレーダでは5分ごとに立体観測を実施していることを活用して、3次元での降水セル追跡手法を開発した。追跡をすることで、降水セルがどのように発達していくかをとらえることができ、また、地上に落下する位置のおおよその検討がつく。また、現場で監視することを考慮して、追跡の自動化にも取り組み、成功率84%（19事例中16事例で自動追跡可能）で自動追跡が可能であることを示した。

■危険性予知

立体観測による早期探知によって、いち早くとらえた豪雨のタマゴが豪雨へ発達するのかどうかを判断する指標を作成した。開発方針として、どれくらいの豪雨に発達するのを見いだすのではなく、危険な豪雨に発達するのかどうかという定量的な指標を作成した。XバンドMPレーダで観測されるドップラー風速から渦度を算出し、解析した豪雨19事例の全てにおいて高い渦度が観測されることを示した。また、発達しない事例では高い渦度が時間的に継続しないことを示した。

最後に、上記3つのアプローチを一連の流れでつなげることで、ゲリラ豪雨に対する早期危険性予知システムを構築した。

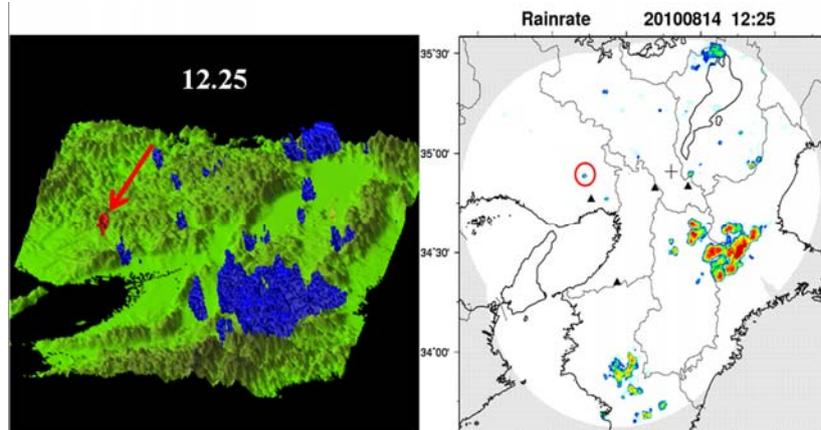


図3 構築したゲリラ豪雨の早期危険性予知システム（左：立体、右：平面）
（赤色が豪雨へ発達すると予知した上空に存在する降水域）

2) 運動学的予測手法（短時間降雨予測）

1分間隔、250mメッシュ、3次元観測が可能なXバンドMPレーダの特徴を活かした、2種類の運動学的降雨予測手法（高度別移動予測手法、セル追跡法）を開発した。

高度別移動予測手法は、CAPPI（等高度面）データを用いて、それぞれの高度に対して移動予測を行い、各メッシュの鉛直最大値を予測雨量とする手法である。一方、セル追跡法は、個々の降水セルを抽出・追跡した結果得られる各セルの発達・衰弱傾向（面積と平均降雨強度の変化傾向）を外挿する手法である。開発した2手法と、従来手法の特徴を表1に示す。

表1 各降雨予測手法の特徴

手法	雨域の発達効果	雨域の衰弱効果	モデルの特徴
高度別移動予測	あり	なし	<ul style="list-style-type: none"> 上空に先行して存在する強雨域を、予測に反映可能 衰弱は表現しないため、従来の移動予測に比べて、見逃しが少なく、空振りが多い
セル追跡法	あり	あり	<ul style="list-style-type: none"> 各降水セルの発達・衰弱傾向を考慮することが可能（10分先の予測精度が高い） 従来の移動予測に比べて、降雨の急激な発達時の予測精度が高い
従来手法	なし	なし	<ul style="list-style-type: none"> 最新時刻の観測雨量分布を、移動予測により外挿 雨域の発達・衰弱は表現しない

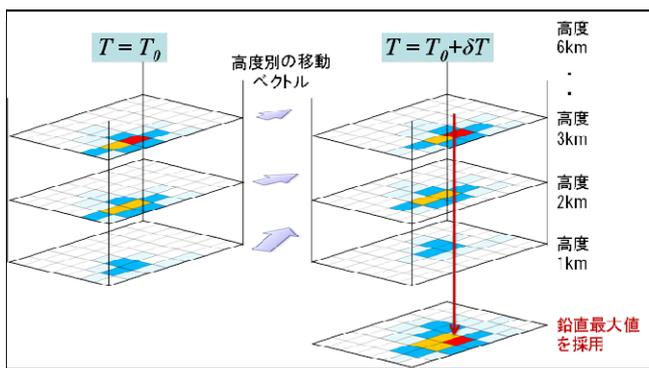


図4 高度別移動予測手法の概念図

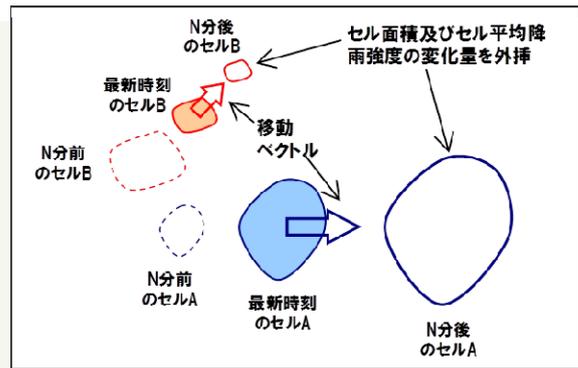


図5 セル追跡手法の概念図

開発した運動学降雨予測手法（2種類）と従来手法について、60分先までの予測精度を検証した結果、10分先についてはセル追跡法の予測精度が最も高いこと、セル追跡法の予測精度は、30分先で従来手法と同程度となること、高度別移動予測雨量の総雨量比は1.5~2.0と過大な（空振りは多いが、見逃しの少ない）予測となっていることが分かった。

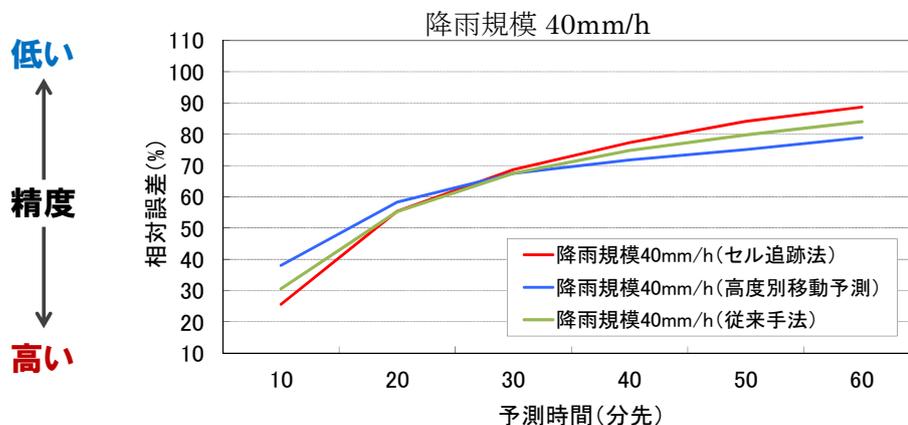


図6 降雨予測手法毎の相対誤差の比較（空間規模:10km²）

本研究により開発した「高度別移動予測手法」は、利用者にとって安全側の予測（見逃しの少ない予測）

が必要な場合に有用なモデルであり、「セル追跡法」は、従来手法に比べて 10～20 分先の予測精度が向上しており、「中小河川における親水域の警報システム」の入力値として活用が期待できることが分かった。

3) 物理学的予測手法（数時間降雨予測）

数時間先の降雨予測においては、物理学的予測の果たす役割が大きい。ただし、短時間予測においてはモデルの初期値精度が予測精度に大きく影響するため、XバンドMPレーダの観測情報をデータ同化する手法を開発した。積乱雲スケールの雲をモデル初期値に形成するために、MP機能の特長を活かして、氷相降水粒子の混合比を同化する手法を開発した。

■氷相降水粒子混合比の推定手法の開発

ファジー理論を用いて、XバンドMPレーダの観測値を入力値として、それぞれの粒子種類の存在比を算出し、反射因子によって存在量の制約をかけることで、氷相降水粒子混合比の推定手法を開発した。また、開発にはCバンドレーダを用いたため、Xバンドレーダでも適用できるように調整した。

■ドップラー風速、反射因子、氷相降水粒子混合比のデータ同化

2012年7月15日の京都・亀岡豪雨を対象に、XバンドMPレーダで観測されるドップラー風速、反射因子、氷相降水粒子混合比を同化した。同化なしの予測では、六甲山での上昇流がほとんど発生しなかったために降水が形成されなかったが、ドップラー速度を同化することで、六甲山での上昇流を形成することができた。また、氷相降水粒子混合比を同化することで、上空の雲を形成することができ、北摂山系での降水強化機構に働くことを示した。

②河川水位予測手法

精度・分解能が向上したXRAIN雨量情報を河川水位予測に利用するにあたっての要点を以下のように考えた。

- 利用者側の観点からは、流量ではなく「水位」を予測する必要がある
- 水位観測情報を実時間で取り込んで精度を向上させる必要がある
- 予測に要する時間を短くするため計算負荷の軽さが必要である

水位観測情報をカルマンフィルタで取りこむ方法を3種類構築し、比較検討を行った。

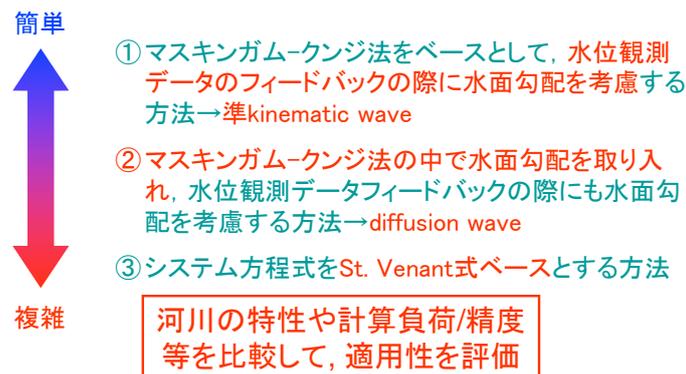


図7 構築した河川水位予測手法

これらのモデルを緩勾配河川と急勾配河川に適用し、適用性を検討した。その結果、St. Venant式による方法が精度・安定性も良く、また、計算時間も十分短かったため、適用性に優れると判断した。

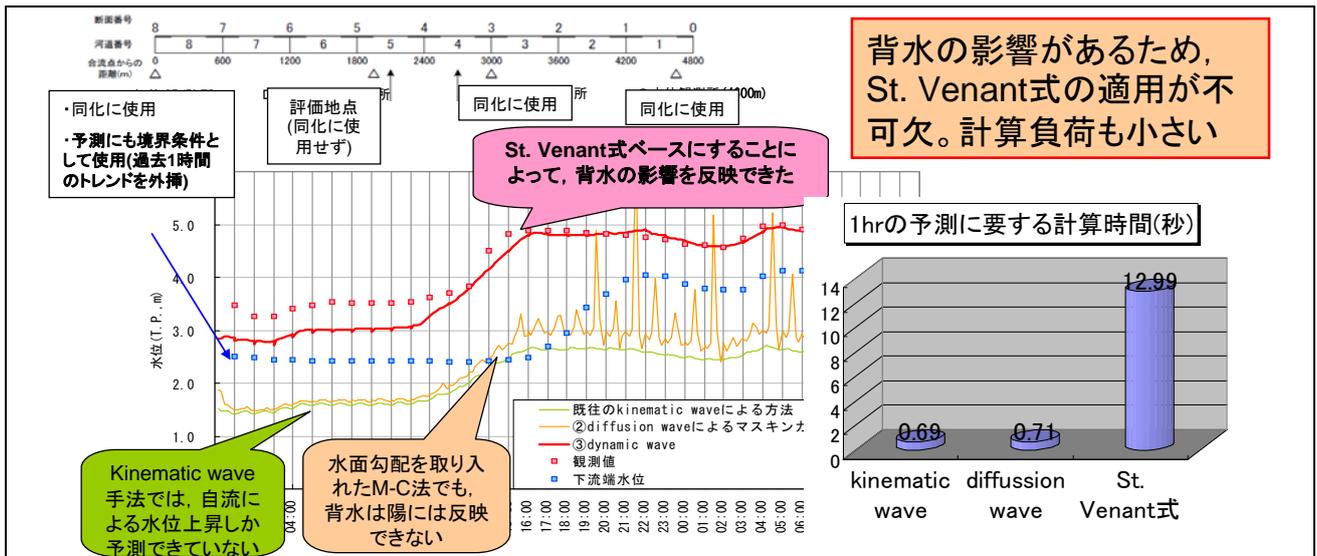


図 8 河川水位予測手法の比較結果

さらに、流域からの流出量等も河川水位観測値で補正する方法を開発した。これによって、降雨観測・予測の誤差を河川水位観測値で補正できる効果がある。

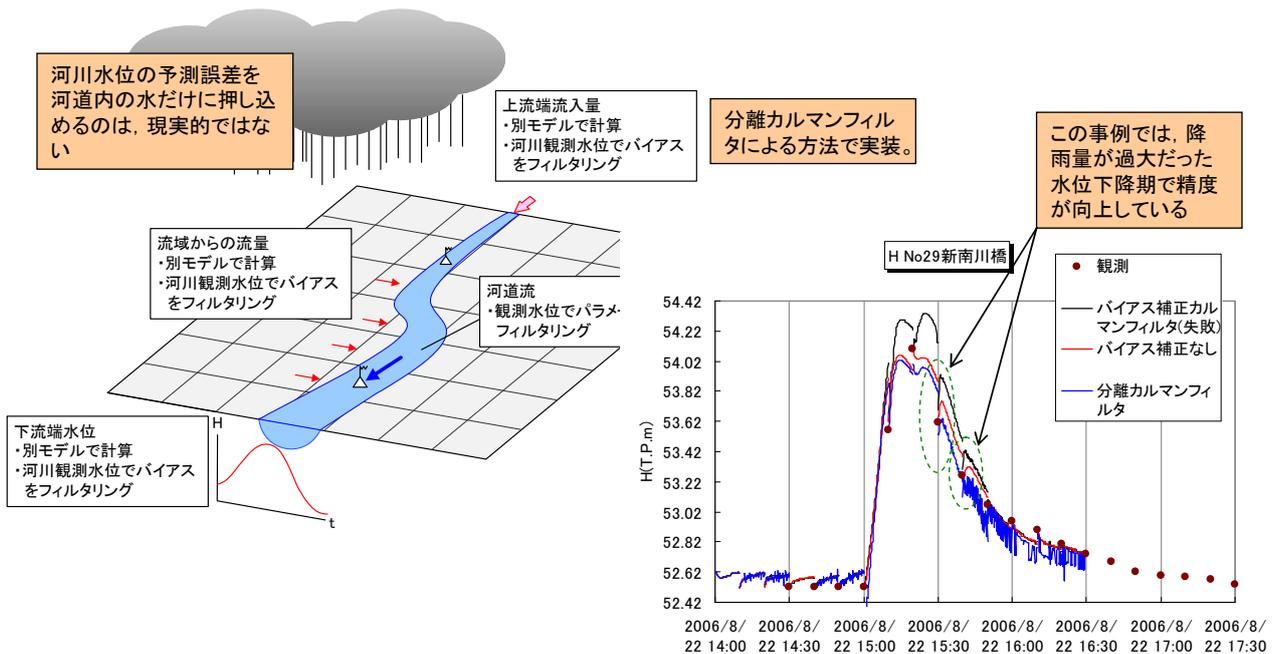


図 9 流域からの流出量も河川水位で補正する方法の概要

③都市浸水予測手法

都市における局地的豪雨時の内水氾濫が再現可能な浸水評価モデルを構築するとともに、その再現に求められる要件を検討した。なお、都市浸水の再現性を論じるに際しては、浸水再現精度を評価するための実績資料が量的質的に得られないことが大きな課題となる。これへの対応として、本研究では可能な限り都市の雨水流出・浸水過程を詳細に表現する浸水評価モデルを構築したうえで、このモデルによる浸水評価結果を比較対象として、その精度を確保するための要件を検討した。その結果、都市内水氾濫の再現に際しては「下水道・地表面の解像度」と「入力雨量情報の空間・時間分解能」の影響が大きいことを確認し、浸水再現精度の確保に必要な浸水評価モデルの要件を明らかにした。また、本結果から下水道施設及び地表面の取り扱いの簡素化を行った場合でも概ね詳細モデルと同程度の再現精

度を確保することが可能であり、浸水再現精度を確保しつつ、計算負荷を縮減できる可能性があることを示した。

また、リアルタイム制御や減災支援を実現するためのリアルタイム浸水予測手法を構築した。具体的にはまず、浸水再現精度の確保と計算負荷の縮減が両立可能な物理モデルによる氾濫解析手法を検討した。その結果、都市内水氾濫の再現においては、従来から用いられてきた比較的簡素な手法によっても十分に浸水の再現性が確保でき、大流域や排水系統が複雑で計算に時間を要する場合、あるいはリアルタイム予測の視点から計算時間の短縮が求められる場合には、これらの手法が有効な手段となりうることを確認した。次に、さらなる計算時間の短縮を図るため、面的な浸水状況を逐次かつ瞬時に予測する手法、具体的には、計算負荷が大きい雨水流出過程を物理的に逐次計算する手法ではなく、統計的手法を用いて雨量情報などから浸水状況を直接的に評価する手法を開発し、実流域への適用によってその有効性を確認した。

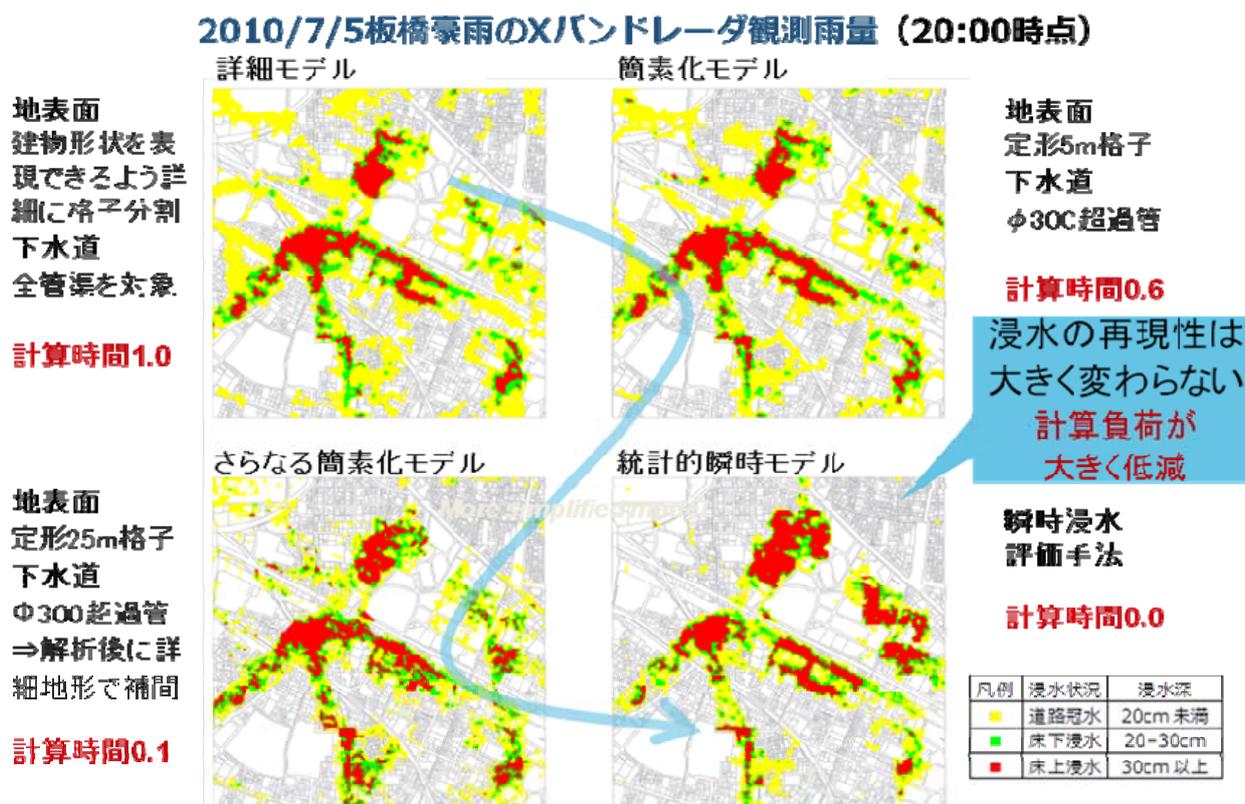


図 10 都市浸水把握手法の開発

(2) 各要素技術を組み合わせた降雨・流出（水位）・氾濫に係わる一体的な予測手法の開発

■ 一体予測システムの基本構成

ゲリラ豪雨の早期探知及び降雨の定量的予測（運動学的手法、物理学的手法）と、河川水位予測、都市浸水予測をくみあわせた一体的かつ一連の予測システムを構築するうえで必要となる [利用用途]、[必要とするリードタイム]、[予測情報の運用イメージと精度要件]、[精度評価指標（誤差評価指標）]、[システム構成] を整理した。

また、予測システムの導入を想定する流域を抽出・分類し、当面、開発すべき予測システムの用途・目的を整理した。

■ 中小河川における洪水警報システム

中小河川では、大雨・洪水注意報などの気象予警報によって河川利用者への警報を出している事例がある。また、中小河川では洪水予報までは行われず、事前に定めた避難判断水位で避難勧告等の判断基準としている。これらの方法では「空振り」が多いという問題がある。

そこで、XRAIN 降雨情報および降雨予測と連動した河川水位予測が有効と考えられる。

中小河川の水位予測では、降雨量の精度が決定的に重要である。そこで、降雨量の精度と河川水位予測精度の関連を検討した。検討には、河川水位観測値でフィルタリングをおこなうモデルを適用した。

勾配が大きく、降雨量の精度が水位予測精度につながりやすい事例を検討したところ、次のような知見が得られた。

河川水位観測値で河川の水位流量のみをフィルタリングするモデルでは、降雨量が実績値の 50% を切ると、水位上昇が大きく遅れ、また、基準ラインまで上昇しないという予測が出るため、危険である。河川水位観測値で流域からの流出量もフィルタリングするモデルでは、降雨量を過小に予測しても補正が効くため、水位予測の精度はそれほど落ちない。よって、降雨強度の値よりも雨域の位置の予測も重要である。

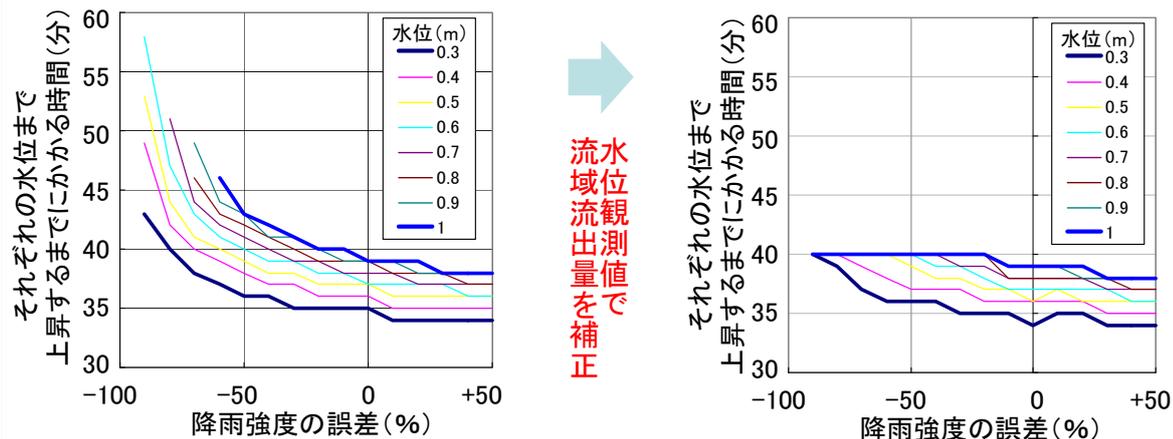


図 11 水位上昇にかかる時間の予測精度と降雨強度の予測精度の関連

■中小河川における親水域の警報システム

親水域における警報システムとして、降雨予測と水位予測を一体化したシステムを開発した。ゲリラ豪雨災害から少なくとも人命を守るという観点から、水位の精度は多少落ちるとしても大まかに親水域から避難するために最低限必定の精度で十分であり、その代わりに 1 分でも 1 秒でも早く警報を出すことを目的とした。そこで、シミュレーションの計算時間をほとんど必要とせず、かつ、現場の管理者にとっても視覚的にわかりやすい、警報システムを構築した。

ノモグラフという洪水判断基準テーブルを事前に作成し、平均降雨強度と降雨継続時間という降雨の二つの情報のみで、水位を予測するシステムを構築した。降雨情報として、地上雨量計、レーダ雨量計、レーダ予測降雨の 3 種類によってそれぞれ得られる平均降雨強度と降雨継続時間を入力値として、9 つの洪水事例に適用した。その結果、レーダ予測降雨を用いることで、90% の成功率で水位を予測することができた。さらに、洪水のピーク時よりも 20-30 ほど先行して予測することが可能であることを示した。

表 精度評価表 (水位) ※赤楕円は見逃し

データタイプ	実際洪水水位				精度
	洪水予報	洪水発生なし	遊歩道	陸の高さ	
雨量計観測降雨	洪水発生なし	0	2	0	60%
	遊歩道	0	5	1	
	陸の高さ	0	1	1	
レーダー観測降雨	洪水発生なし	0	1	0	80%
	遊歩道	0	7	1	
	陸の高さ	0	0	1	
レーダー予測降雨	洪水発生なし	0	1	0	90%
	遊歩道	0	7	0	
	陸の高さ	0	0	2	

表 精度評価表 (アラート時刻の先行度)

データタイプ	予測先行時間 T (分)			
	T ≤ 10	10 < T ≤ 30	30 < T < 60	T ≥ 60
雨量計観測降雨	4	2	0	0
レーダー観測降雨	5	3	0	0
レーダー予測降雨	3	4	1	1

■都市内水域の浸水警報システム

構築した解析精度と計算負荷が異なる種々の浸水評価手法を対象として、予測雨量の精度を考慮したリアルタイム浸水予測手法の最適化手法を提案・検証するとともに、都市浸水予測に求められる浸水評

価手法の要件を明らかにした。具体的には、実流域と実際のレーダ情報を用いたケーススタディによって、都市浸水の予測においては必ずしも詳細な浸水評価手法が良い結果を与えるとは限らず、より新しい時刻の予測雨量情報が利用可能となる計算負荷が小さい浸水評価手法の適用が有効かつ必要であることを明らかにした。

また、減災行動を支援するための浸水リスク情報の提供を対象とし、その提供方法の立案方法を提案するとともに、リスクコミュニケーションに必要となる精度や提供効果を定量的に評価した。その結果、提案したリアルタイム浸水予測による浸水警報の発令によって、現在利用している減災情報と比較して情報の精度が大幅に向上し、減災行動回数（空振り回数）の低減という直接的な効果が期待できることを確認した。また、あわせて、減災情報の発令において入力とする降雨予測の精度要件や降雨予測の高度化による発令精度の向上効果を定量的に評価することができた。

■施設運用支援システム

整備済みの浸水対策幹線を対象とし、これを用いた浸水対策運用と合流改善運用について、その運用方法の立案方法を提案するとともに、その運用効果を定量的に評価した。浸水対策幹線は広域的に配置される大容量の施設であることから、局地的豪雨の広域対応による平準化や幹線容量を活用した一時貯留による汚濁負荷削減等について大きな効果が見込まれる。このため、積極的な運用が期待される方策であるが、実時間制御を必要とし、浸水リスクが悪化する危険性を伴うことから、積極的な運用が図れていない状況にある。ここでは、浸水リスク及び降雨の予測誤差を定量的に取り扱うことによって、浸水リスクを悪化させない運用方法を定めるとともに、入力とする降雨予測の精度要件や降雨予測の高度化による合流改善効果を定量的に評価することができた。

さらに、雨水貯留施設の実時間制御の事例として、初期貯留によるノンポイント汚濁負荷削減とピークカット貯留による浸水防止の両目的を達成するための緊急排水操作ルールを作成・評価を行った。まず、仮想的な誤差分布を与えたモデル降雨に基づいて緊急排水操作を実施した場合、雨水流出モデルによって計算された浸水量と降雨予測誤差の積で与えられる浸水量期待値について評価を行った。その結果、降雨予測相対誤差の平均で約40%以下、標準偏差で約0.5以下に収まる範囲では、浸水量の増大は小さく、予測雨量情報に基づいて雨水貯留施設を浸水防止目的と汚濁負荷削減目的の両目的で運用する場合にも、降雨予測相対誤差平均値が小さいことが望ましく、Xバンド偏波レーダーによる雨量情報が有効である可能性を示した。また、浸水深の計算結果から、床上浸水が発生する可能性が高いのは浸水量が11万 m^3 を越えたときで、初期貯留容量を18,000 m^3 以下にすれば、20年確率降雨においても床下浸水が初期貯留によって床上浸水に悪化する事態を防ぐことができるという可能性を示すことができた。

次に、2009年～2010年における、比較的降雨量の大きい10降雨事象を対象として、気象庁C-bandレーダー情報と移流モデルを用いた予測降雨データを作成して雨水貯留施設の実時間制御を実施した。対象降雨事象の中には10年確率降雨強度を超過する事例も含まれていた。実時間制御シミュレーションを実施して、浸水発生量や緊急排水操作の有無および緊急排水が間に合わず初期貯留雨水が残存して流量増加時のピークカット貯留の実施を制約する場合や降雨予測が過小となり、緊急排水操作が実施されない事例などの検証を行った。その結果、降雨規模最大の事象においては、降雨予測精度が比較的高く、降雨ピーク時刻までの積算降水量や最大降雨強度の予測相対誤差が数%～25%以下となり、ピークカット貯留実施までに緊急排水が完全に実施され、浸水リスクを増大させることは無かった。しかし、他の降雨事象では、おおよそモデル降雨を用いた評価結果と同様に、相対誤差が30%～40%を越えると、緊急排水操作が間に合わなかったり、実施されなかったりすることで、初期貯留雨水が貯留施設内に残存し、浸水防止目的のピークカット貯留に供する貯留容量を完全に確保することができなかった。ただし、降雨規模が小さく、貯留施設が満杯となり浸水を発生させた事例は無く、降雨事例数も少ないために降雨予測相対誤差が大きく異なる値をとったために、緊急排水操作実施によって浸水リスクが増大するしきい値となる降雨予測相対誤差率の評価には至らなかった。そこで、本年度では2つの降雨事象について解析対象領域を中心とする周囲のグリッドの降雨予測情報をもとに解析した結果、降雨予測相対誤差と浸水リスク指標について複数の関係性を見いだすことができた。

【4】今後の課題・展望

実用化実験を通して精緻化を図り、各要素技術の高度化のみならず、要素間の連携手法に関する技術開発がさらに進んでいくと期待される。