

# 雨水貯留施設の実時間制御における レーダー降水量予測情報の活用方策に関する研究

## Application Strategy of RADAR Forecasting Information for Real Time Control of Urban Stormwater Storage System

城戸 由能・佐藤 豪<sup>(1)</sup>・中北 英一

Yoshinobu KIDO, Go SATO<sup>(1)</sup> and Eiichi NAKAKITA

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of engineering, Kyoto University

### Synopsis

In recent years, generation of urban flooding has become a problem. On the other hand, water pollution of urban river due to the influx of pollutants from non-point source also has become a problem. Therefore, in this study, to make effective use the big tunnel rainwater storage facility, named "Donryu" in Nishi-hadukashi river basin, in both purpose of preventing flood and pollution and to propose control strategy, the optimal application strategy of RADAR forecasting information is estimated by a probabilistic analysis of flooding risk derived from the error of predicted rainfall.

**キーワード** : 雨水貯留施設, 実時間制御, レーダー降雨予測, 都市水害

**Keywords**: Rainwater Storage System, Real-Time Control, RADAR Rainfall Forecasting, Urban Flood

## 1. 研究の背景と目的

### 1.1 都市化による水災害・水質問題の発生

近年, 我が国において都市への人口や生産基盤の集中, 都市化に伴う不浸透域の拡大, 産業構造の変化, ライフスタイルの変化や近年の気候変動等, 都市を取り巻く社会条件や環境条件は変化しており, 田畑の宅地化や道路の増大等による不浸透面積率の増加や下水道整備の進捗は, 雨水の公共用水域への流達時間の短縮化, ピーク流量の大幅な増大を招いている。また, 地下への浸透が減少し, 直接流出(流出率)が大幅に増加するため, 総流出量も増大する。つまり, 水害ポテンシャルが増大している。このような都市化の進展により生じるようになった水害は「都市水害(あるいは都市型水害)」と呼ばれ, 内水氾濫および内水氾濫を伴う都市の中小河川からの氾

濫も含め, 1960 年頃から頻繁に発生するようになった。本研究が対象とする京都府淀川水系・桂川の支流である西羽東師川流域では, 流域貯留浸透事業実施河川として地下トンネル貯留施設による浸水防止事業が進行中である。

一方で, 都市化による排出負荷量増加や大気由来の微量有害物質等を含む面源負荷の増加により水環境に与える汚濁ポテンシャルも増大している。

高度経済成長期には, 有機水銀やカドミウムを原因とする公害病の発生を受けて, それら有害物質の製造や排出の規制が行われてきた。また有機汚濁汚染対策に加えて, 特に海域や湖沼といった閉鎖性水域では 1979 年に東京湾・伊勢湾・瀬戸内海を指定水域とし, 化学的酸素要求量(COD:Chemical Oxygen Demand)を指標とした総量規制が実施され, 琵琶湖においても同年に富栄養化防止条例が制定された。

さらに 1980 年代から都市内の中小河川等の公共用水域の汚濁原因において生活系負荷の比重が高まってきたことを受け、1983 年の浄化槽法の制定や、1990 年の水質汚濁防止法の改正など生活排水対策が推進された。都市部においても下水道、合併処理浄化槽等を中心とした污水处理システムが普及してきたことにより家庭や工場といった特定汚染源(Point Source)由来の汚濁負荷の浄化が進み、河川などの公共用水域に放流される汚濁負荷は減少してきた。しかし都市河川の水質改善は 1990 年代以降鈍化してきている。これは不浸透化が進んだ都市域で雨天時の直接流出量が増大するのに伴って流出する汚濁物質も増加していることが一因であり、屋根面や地表面等の面的に分布して発生源が特定しにくい非特定汚染源負荷(Non-point Source)については根本的な対策がとられてこなかったためである。その負荷源は、大気からの降下物や自動車のタイヤ片など様々な汚濁物質が地表面や屋根面などに堆積したものであり、降雨初期に負荷の流出が集中し高濃度の汚濁水が流出する、いわゆるファーストフラッシュ現象による高濃度の汚濁負荷を含む流出雨水の水質は無視できないことが明らかになった。このように河川や湖沼の水質悪化の原因として非特定源汚濁物質の影響が相対的に大きくなってきている(金, 2000)。そのため、流出雨水は水質的に問題がないと考えられていた分流式下水道整備区域において非特定源汚濁物質の対策を講じることが求められている。

このノンポイント汚濁の改善としても貯留施設の利用が検討されている。このファーストフラッシュにおける高濃度の汚濁水を貯留し、下水処理システム等により処理したのちに河川など公共用水域に放流することで、汚濁負荷の流入量削減が検討されている。このとき、貯留施設として利用が考えられているのが、浸水被害防止目的で建設が行われている貯留管である。

このように現在、目的は異なるものの都市地下部に建設されている下水道関連貯留施設は浸水防止・汚濁負荷流入削減の両目的で運用が可能であり、建設費・運用費が巨額となることを考慮した運用が重要である。その際考えられる運用方法として降雨予測に基づいた流量予測を用いて、貯留施設の操作を行う実時間制御(RTC; Real Time Control)がある。

## 1.2 実時間制御による貯留施設運用

合流式下水道、分流式下水道どちらの整備区域においても雨水貯留施設の RTC による汚濁負荷削減の効果があることがすでに多くの研究がなされており、新たに同等の効果をもつ施設を整備する場合と比べ

て費用的にも効率的であることが示されている。本研究でもこの RTC によって治水目的で整備された貯留施設を汚濁負荷削減目的でも利用するための運用方法について検討する。

雨天時のノンポイントソースからの汚濁物質の公共用水域への流入削減を行うことを考える上で重要なことは、流出初期のファーストフラッシュを貯留(初期貯留)し、処理することである。これはファーストフラッシュにおける汚濁物質濃度が極端に高いからである。ただし総量的にはピーク時も汚濁物質の流出量が多くなるが、雨水流量も多いことから濃度は低くなる。一方、内水災害防止、軽減のためには、流出ピークを貯留(ピークカット貯留)することが重要である。概念図を Fig.1 に示す。そのため降雨初期には汚濁対策として貯留容量の一部を使用して初期貯留を行い、降雨終了後に下水処理場において処理することで汚濁負荷の削減が期待できる。しかし、初期貯留により本来ピークカット貯留に割かれるべき容量がすでに使用されていることから、貯留容量不足に陥ることが考えられる。この事態を避けるために、予測降雨で浸水発生が予測されると直ちに初期貯留雨水を排水(緊急排水)することでピークカット貯留の容量を確保することが可能となる。このように本研究では通常は汚濁対策として貯留施設を利用し、緊急に貯留容量の確保が必要になった時には出水前に緊急排水を行って貯留容量を確保し浸水対策として貯留施設を利用する制御方法を想定した検討を行う。

以上のように RTC により初期貯留でファーストフラッシュを含む流出雨水をノンポイントソースからの汚濁負荷削減を行いつつ、予測降雨により浸水発生が予測される場合はピークカット貯留に必要な容量を確保するために初期貯留雨水の緊急排水を行う制御戦略について述べてきた。しかし、操作の上で重要である降雨予測には誤差が含まれており、その誤差によって予測よりも早期に大規模出水が発生する可能性があり、その場合緊急排水が間に合わず、浸水氾濫を増大させる可能性が生じる。このことが初期貯留とピークカット貯留を行う RTC が実施への導入には至っていない大きな理由である。

## 1.3 降雨観測情報としてのレーダー情報

現在、降雨観測情報として気象レーダーによる観測がされており、既往の Cバンドレーダーによって広域的な降雨観測が行われていたが、2011年に局地的豪雨や集中豪雨の被害低減にむけて Xバンド MPレーダーが導入され、より高分解能での観測が可能になった。Xバンド MPレーダーが降雨減衰に弱く定

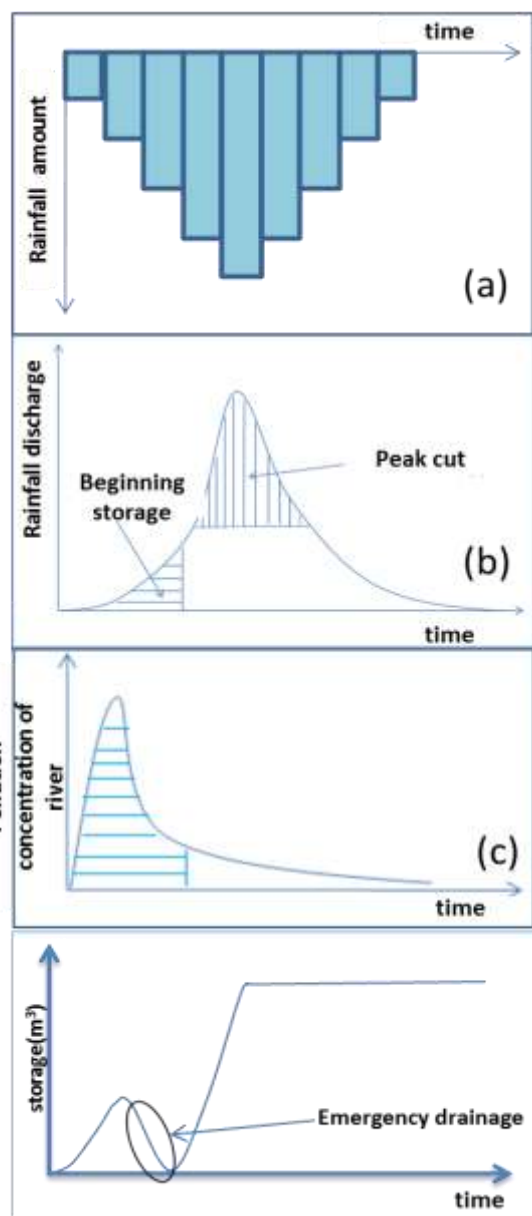


Fig.1 Conceptual diagram of beginning storage, peak cut, emergency drainage

量観測範囲が60km以内と狭いのに対し、Cバンドレーダーは降雨減衰に強く、定量観測範囲が120km以内と広いという利点を持つ。本研究ではこれらのレーダー情報に基づく降雨予測を行い、その情報活用方を検討する。

#### 1.4 研究の目的

本研究では、浸水防止を主目的とする雨水貯留施設(いろは呑龍トンネル)が整備中の京都府・西羽東師川流域を対象に、レーダー降水量予測情報に基づいた浸水防止・汚濁負荷削減の両目的での貯留施設の運用を現実的に導入可能な制御戦略について検討

を行うことを目的とする。浸水防止目的で整備された貯留施設は、浸水防止目的での使用の場合、年に数度から数年に一度程度の利用頻度となるが、汚濁防止目的での利用により、その使用頻度は増大し便益が高まる。しかし、当然浸水防止目的を低下させないことが前提条件であり、そのためには、近年降雨量推定・予測研究開発の進捗が著しい最新型高解像度偏波レーダー情報に基づく降雨予測情報の有効な利用が重要であり、その情報活用方策について検討する。

## 2. 解析手法、対象領域およびモデルの概要

対象領域において、レーダー観測降雨・およびそれに降雨予測モデルを用いて得られた予測降雨をもとに雨水流出解析を行う。観測降雨に基づく流量をもとに貯留施設の貯留量を算定し、予測流量をもとに施設の制御を決定する。

### 2.1 対象領域

本研究は、淀川水系の中流域に位置する一級河川桂川の支川で桂川の右岸地域に位置し、京都市・向日市を流下する一級河川西羽東師川流域を対象とする。Fig.2に西羽東師川の位置を示す。西羽東師川は京都市右京区の嵐山付近で桂川を農業用水として取水する一ノ井農業用水路が流域の北端である。一ノ井農業用水路は南下し、洛西農業用水路、荒木川等と合流し、寺戸川と名前を変え、京都市南区久世付近で川幅が広がり、名前も西羽東師川となって京都市伏見区淀付近で桂川に合流する。本流域周辺地域は、JR東海道本線や阪急電鉄京都線および国道171号などの交通網が発達し、高度経済成長期から急激に都市化が進行し、住宅地や企業が混在するなかで、人口密度も非常に高い地域となっている。このため人為的な負荷源である特定汚染源負荷とともに都市地表面等の非特定汚染源負荷が降雨時に流出することから、河川水質の汚染レベルが高くなっている。一方、この流域は、一級河川の小畑川と桂川に挟まれたすり鉢状の地形であることや、多くの鉄道橋や道路橋が架かっているために拡幅困難な寺戸川や石田川などの西羽東師川の上流部や支川にあたる中小河川が主な排水路となっていることから、これまでに幾度となく浸水被害を伴う氾濫を繰り返してきた経緯がある。また交通網の盛土などで氾濫流が妨げられ、氾濫原が地形的に固定され、このために浸水深が高くなりやすいという地形的特性をもっている。

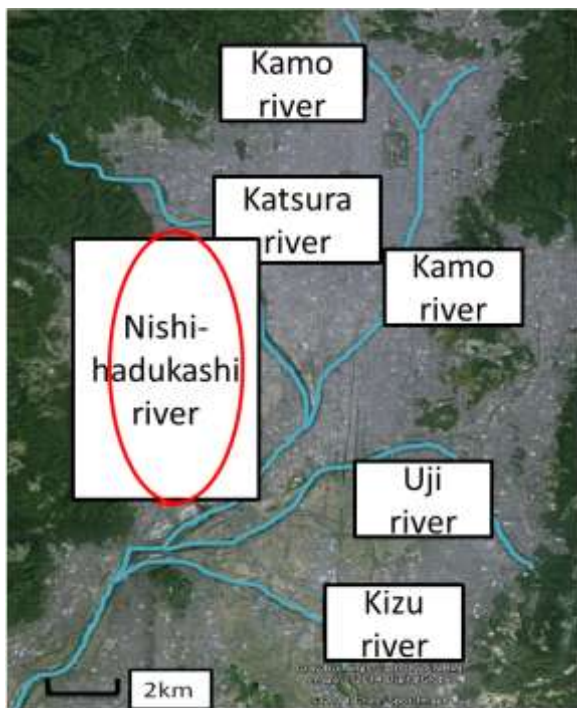


Fig.2 Map of Target area

本流域では過去20年に浸水戸数100戸以上の浸水被害が何度も発生している。近年、短時間で局地的に猛烈な雨の降る、いわゆる「ゲリラ豪雨」が多発している。2008年7月28日の、神戸市都賀川におけるゲリラ豪雨による水難事故が記憶に新しいが、同日に本研究対象地域でも、1時間雨量63mmという豪雨に見舞われ、向日市では地下道の急激な冠水により幼稚園バスや乳児を乗せた乗用車が水没し、消防隊に救助されるといった被害が発生した。2013年9月15日には台風18号による大雨の影響で桂川が渡月橋と羽東師橋付近で氾濫するなど甚大な被害が発生したが、対象地域でも寺戸町永田・二ノ坪地区などにおいて4戸が床上浸水、102戸が床下浸水の被害が発生し、農作物にも一部被害が発生した。

向日市の公共下水道による雨水整備は平成6年度に事業着手し、平成8年度に策定した「向日市下水道雨水排水基本計画」に基づいて実施されている。本計画では、目標年次を平成22年度とし、寺戸川流域や石田川流域など市内を8つの雨水排水区に分割し、排水区面積約767haについて雨水幹線や貯留施設を整備することになっている。特に寺戸川排水区においては、平成9年から供用を始めた向日市の寺戸川1号幹線、および平成13年から暫定供用を開始した京都府「いろは呑龍トンネル」(以下呑龍トンネル)が流出抑制の役割を果たし、両者を合わせた貯留能力は約6万 $m^3$ である。一方石田川排水区では、平成11年度から約1.1万 $m^3$ を貯留する石田川1号幹線の建設が開始されている。また石田川2号幹線、和井川雨水

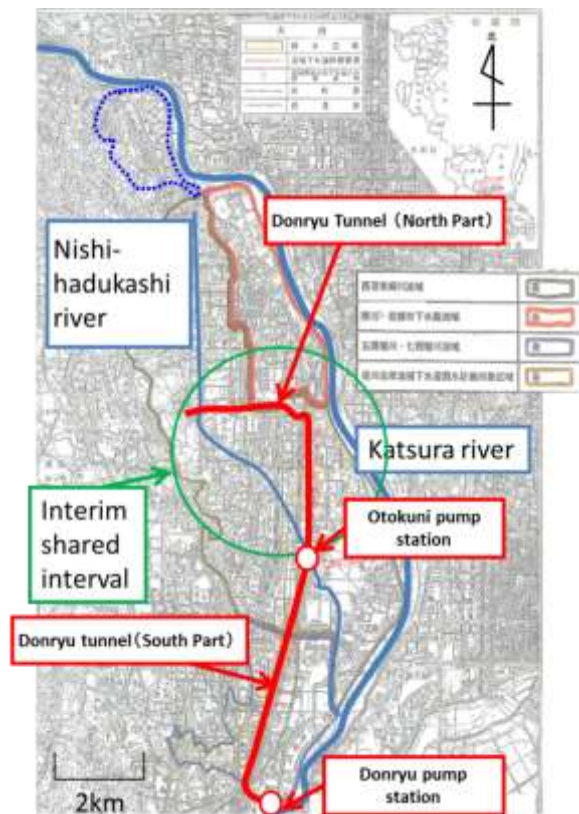


Fig.3 Map of Donryu Tunnel

幹線の建設も計画され、その末端には京都府桂川流域下水道乙訓ポンプ場が建設され、呑龍トンネルが接続予定であり、このポンプ場から西羽東師川本川への排水が行われる予定である。このように、京都府流域下水道雨水事業と連携して向日市の下水道雨水排水対策が計画的に進められている。

## 2.2 雨水地下貯留施設(呑龍トンネル)の概要

呑龍トンネルは延長約9.2km、容量約18万 $m^3$ の大規模な施設である。Fig.3に呑龍トンネルの概要を示す。このうち、北西端部の北幹線1号管渠(全長935m、内径8.5m)について2001年6月1日から暫定供用が開始され、約5万 $m^3$ の雨水が貯留可能となった。暫定供用では貯留された雨水は河川水位の低下後に0.27  $m^3/s$ の能力で徐々に西羽東師川上流部の寺戸川へ排水されている。今後トンネル全体が建設される過程で乙訓ポンプ場と最下流端の呑龍ポンプ場から排水される計画となっている。その延長部分である北幹線2・3号管渠についても、掘進作業が2007年8月に、また乙訓ポンプ場などの排水施設や接続施設の工事も完了し、現在は北幹線全線供用を開始している。これにより全体計画の約半分の区間が供用されており、107,000 $m^3$ の雨水を貯留することができる。当初の計画では暫定供用の現在と同様に一旦貯留した雨水は降雨終了後西羽東師川に排水するこ

とになっていたが、現在北幹線に接続する南幹線が桂川右岸流域下水道・洛西浄化センター付近まで延伸がされており、北幹線・南幹線を合わせて2020年に完成予定である。そこに設置されるポンプ場(呑龍ポンプ場)から貯留水の一部を降雨中に桂川本川へ直接放流することで、流下管として機能し、連続する大規模降雨にも対応して、流域内排水路の雨水排除能力を越えた雨水をトンネル貯留施設に取り込むことができるようになる。これとともに、10年確率降雨に対する計画容量を約5万m<sup>3</sup>縮減できる予定である。

## 2.3 モデルの概要

### (1) 降雨予測モデル(移流モデル)

短時間降雨予測の基礎手法である椎葉・高棹・中北(1984)の移流モデルを用いた。ここではその概要を示す。

移流モデルとは降雨強度分布  $R(x, y)$  を移流ベクトル  $(u_r(x, y), v_r(x, y))$  に沿って移流させながら  $\delta(x, y)$  で発達・衰弱させるモデルで、20~30分先のメソ  $\gamma$  スケールの降雨予測や、1~2時間先のメソ  $\beta$  スケールの降雨予測などのごく短いスパンでの予測に適している。本手法では、降雨分布の変化が移流方程式

$$\frac{\partial R(x, y)}{\partial t} + u_r(x, y) \frac{\partial R(x, y)}{\partial x} + v_r(x, y) \frac{\partial R(x, y)}{\partial y} = \delta(x, y), \quad (2.1)$$

によって表現されるものとする。ただし、雨域の移流ベクトル  $(u_r(x, y), v_r(x, y))$ 、単位時間当たりの発達・衰弱量  $\delta(x, y)$  は

$$\begin{aligned} u_r(x, y) &= c_1 x + c_2 y + c_3, \\ v_r(x, y) &= c_4 x + c_5 y + c_6, \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\delta(x, y) = c_7 x + c_8 y + c_9,$$

のように位置の一次式として表現できると仮定し、式(3.10)と合わせて線形最小自乗法を用いて、時々刻々と得られる降雨強度分布  $R(x, y)$  から  $c1 \sim c9$  を推定する。予測では、算定された移流ベクトルに沿って、解析的に追跡することにより予測時刻の降雨を算定する。同時に、移流ベクトルに沿って移流した際の発達・衰弱量の積分値も解析的に算定し降雨量を修正する。

今回使用した移流モデルでは、国土交通省のXバンドレーダーとCバンドレーダー、気象庁のCバンドレーダーの情報を利用して予測を行い、単純な1次式として移流させるため発達・衰弱項は無視し ( $c7 \sim c9=0$ )、20分前・10分前・現在の3つのレーダーデ

ータをもとに10分間隔で1時間先まで予測を行った。

### (2) 雨水流出モデル

本研究では流域に降った降雨が流出する過程について Kinematic Wave Model を用いて流出現象のモデル化を行った。対象流域である西羽束師川流域の中央部は低平地で、既存の農業用水路と都市排水路を用いた雨水排除が行われており、流下方向は水路網により特定される。また、主要な鉄道・道路等が盛土で立体交差となっており、これが堤体となり雨水流下方向は必ずしも地表勾配に沿った流れとはならない。水路網や交通用地等を考慮して計73個の支流流域ブロックに分割を行い、支流流域ごとに左右の長方形斜面に分割し、斜面面積、斜面勾配、等価粗度などを設定した。

西羽束師川は下流部の河道勾配は 1/1000 と緩勾配である。また河口部では流入先の桂川の水位によって流入できなくなるため排水機場が設置されている。このように流域下流部部では背水の影響を受けるため、それらを表現できる Dynamic Wave Model などを利用すべきである。しかし本研究では主に中流部までの洪水流を再現することが重要であり、また観測値においても背水の影響を受けていない三反田橋を解析上の下流端として扱っているため、Kinematic Wave Model を用いても良好な再現精度が得られている<sup>3)</sup>。そのため今回は河道流についても Kinematic Wave Model を用いて計算を行った。

モデル化された長方形斜面の雨水流には式(2.3)の Manning 式を適用する。なお斜面勾配および粗度係数は斜面上でそれぞれ一様とみなす。

$$v = \frac{1}{N} I^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}} \quad (2.3)$$

ここに、 $v$  は流速、 $N$  は等価粗度、 $I$  は斜面勾配、 $R$  は径深である。薄層流を仮定すると、 $R \approx h$  ( $h$ : 斜面上の水深) と近似できる。単位幅あたりの流量は式(2.3)を用いると、

$$q = \frac{1}{N} I^{\frac{1}{2}} h^{\frac{5}{3}} \quad (2.4)$$

となる。これを水深  $h$  について解くと

$$h = \left[ \frac{N}{I^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{3}{5}} q^{\frac{3}{5}} = K q^{\frac{3}{5}} \quad (2.5)$$

となる。ここに  $p=0.6$ ,  $K = \left[ \frac{N}{\frac{1}{I^2}} \right]^p$  である。また連

続式は

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (2.6)$$

と表される。ここに、 $r$  は有効降雨強度、 $x$  は流下距離、 $t$  は時間である。

河道流に対しても斜面の場合と同様に Manning 則を適用して、

$$v = \frac{1}{n} I^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}} \quad (2.7)$$

と表される。ここに、 $n$  は粗度係数である。径深  $R$  については

$$R = k_1 A^z \quad (2.8)$$

と近似する。ここに、 $A$  は流積、 $k_1 \cdot z$  は河川横断面より決まる定数である。河道の流量  $Q$  は式 (2.7) と式(2.8)より、

$$Q = vA = \frac{1}{n} I^{\frac{1}{2}} \left( k_1 A^z \right)^{\frac{2}{3}} A = A^{\frac{3+2z}{3}} \frac{1}{n} k_1^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

と表される。式(2.9)を  $A$  について解くと、

$$A = \left[ \frac{n}{\frac{2}{k_1^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}}} \right]^{\frac{3}{3+2z}} Q^{\frac{3}{3+2z}} = KQ^p \quad (2.10)$$

となる。ここに、 $p = \frac{3}{3+2z}$ ,  $K = \left[ \frac{n}{\frac{2}{k_1^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}}} \right]^p$  で

ある。また河道における連続式は、

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (2.11)$$

で表される。計算では、斜面流については式(2.5)、(2.6)を、河道流については式(2.10)、(2.11)について特性曲線法を用いて解く。

### (3) 貯留施設モデルと貯留施設操作

本研究では貯留施設として呑龍トンネルを想定する。呑龍トンネルは計画総延長 9km のトンネル状の

施設であるので詳細にモデル化を行うためには貯留管内の流下についても表現することが求められるが、本研究が対象としている初期貯留及び緊急排水といった現象はある程度の水量が貯留管内に存在する状態を初期条件としてポンプによる排水などを行うことから、貯留管内の流下を省略し1つの単純なタンクであると仮定した。

貯留管への流入点は2か所とした。1か所は現在暫定供用における流入口が設置されている寺戸川第四向陽小学校付近で、河川流量がある一定値を越えると越流分が貯留管に流入するように設定されており、ピークカット貯留を行うコントロールポイントとして設定した。もう1か所は西羽東師川の支流である石田川が西羽東師川に合流する乙訓地点付近である。石田川は周辺に工場などが多く存在し流域内の他の枝川と比較しても水質が悪い河川であり、汚濁負荷供給が他の河川よりも大きいという特徴がある<sup>4)</sup>。そのため、降雨初期の流出水を貯留管内に取り込み汚濁負荷削減目的の貯留を行う制御点として設定した。また貯留した河川水を緊急排水するためのポンプ場は乙訓ポンプ場に相当するポンプ場を設定し、ポンプ能力は 10 m<sup>3</sup>/s とした。計画では呑龍ポンプ場の排水能力は 10 m<sup>3</sup>/s であるが、乙訓ポンプ場の計画排水能力は約 0.6 m<sup>3</sup>/s であり、乙訓ポンプ場までの暫定供用の時点では降雨中の排水は行わず、降雨終了後の西羽東師川に排水する計画となっているためであるが、本研究では初期貯留分を短時間に排水する操作を仮定しているので、乙訓ポンプ場においても呑龍ポンプ場と同等の排水能力を設定した。また排水先については計画と同様に乙訓ポンプ場使用時は西羽東師川に排水を行った。貯留管全体の容量としては、現在供用が開始されている呑龍トンネルの北幹線、すなわち乙訓ポンプ場までの区間までを考え、容量を 107,000 m<sup>3</sup> とした。

実際の呑龍トンネルへの流入は、河道の壁面に越流堰が設置されており、そこから呑龍トンネルへ流入する流入口が設置されている地点と、越流堤付近に流入口が開放されており河道から越流した水が呑龍トンネルへ流入する地点がある。どちらの場合も河道の水位(流量)がある一定以上になった時点で流入が開始されるので、呑龍トンネルへの流入が開始する流量を定めることで貯留管への雨水の流入を表現した。このときの流量を  $Q_{in}$  とし、 $Q_{in}$  を越えた流量はすべて呑龍トンネルへ流れ込むものと考えた。実際は一定の割合で流入するため、流入量の時間変化を厳密に再現するためには越流公式などを用いて貯留管への越流を表現する必要があるが、今回は単純なピークカットを仮定した。

初期貯留は、降雨初期に石田川の河川水を全量呑龍トンネルへ流入させることで表現している。この貯留は貯留施設の初期貯留容量( $V_p$ )まで行い、容量が満たされると貯留は停止する。その後は予測降雨により流量予測を行い、ピークカット貯留流入点を設定した第4向陽小学校付近の流量を監視し、その流量が  $Q_{in}$  を越えると予測された時点 ( $T_L$ ) で初期貯留分の排水を行いピークカット貯留に備える。初期貯留容量、ポンプ排水能力とその起動制御、レーダ降雨情報の更新時間、及び移流モデルによる降雨予測と流量予測、これらに要する時間も考慮して、現時刻から1時間先までの流量予測を10分毎に更新し、 $Q_{in}$  を超えた場合に緊急排水を開始し、その時刻を  $T_L$  とする。

予測降雨が過小であると緊急排水開始が遅れて浸水被害は増大する。逆に予測降雨が過大であると緊急排水により貯留施設を空にしても流量が増大せず緊急排水操作は空振りとなる可能性がある。

今回の解析では、先行研究に基づきピークカット貯留開始流量を  $40\text{m}^3/\text{s}$ 、初期貯留容量を  $18,000\text{m}^3$  と設定した。

## 2.4 モデルのキャリブレーション

前節で説明した流域モデルおよび雨水流出モデルを用いた流出解析については、先行研究（鳥井・城戸・中北, 2011）で行ったキャリブレーション結果に基づいた同じパラメータを用いており、流出モデルの再現性は十分であると評価した。

降雨予測に用いるレーダー情報として、国土交通省の X バンドレーダー（波長約 3cm, 空間解像度は  $250\text{m}$ , 以下 X または X250）、同じく国土交通省の C バンドレーダー（波長約 5cm, 空間解像度  $1\text{km}$ , 以下 C1）、気象庁の C バンドレーダー（波長約 5cm, 空間解像度  $1\text{km}$ ）の3つの近畿全域のデータを用いる。既往研究<sup>6)</sup>では気象庁 C バンドレーダーを用いた降雨予測において  $3\text{km} \times 3\text{km}$  (以下 C3) に平均化した上で近畿全域の情報を移流モデルを適用するプログラムを利用した。この移流モデル予測システムを直接 C1 や X250 に適用した場合、移流ベクトル推定のための時空間領域設定の妥当性が不十分で、移流ベクトルが過小に評価された。そこで移流ベクトル算定に用いる空間範囲を C3 では隣のグリッドまでとなっていたものを拡大し、X バンドレーダーについては 10 個離れたグリッド、C バンドレーダーについては 3 個離れたグリッドとして解析を行った結果、移流ベクトルの推定が C3 と同程度に改善された。時間解像度  $\Delta t$  を小さくする、空間範囲の拡大倍率の選定など、移流予測モデルの改善をさらに検討す

べきであるが、本研究の主目的ではないため、この段階での移流モデルによる降雨予測情報を雨水貯留施設の実時間制御の評価を行う。

## 3. レーダー予測情報の活用方策の検討

### 3.1 解析条件

本研究の目的は、降雨レーダー予測情報を用いた雨水貯留施設の実時間制御導入のため、浸水防止と汚濁負荷削減効果の両目的を効率的に達成するため

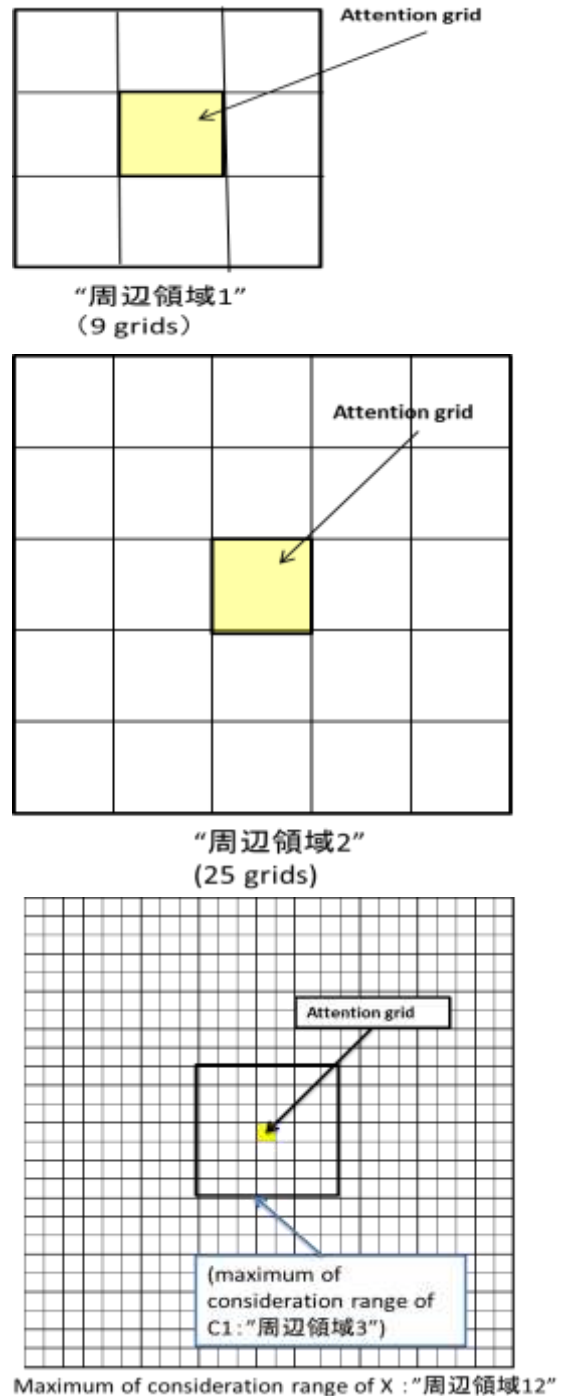


Fig.4 Setup “周辺領域”

のデータ活用方を提案することである。先行研究（中村・城戸・中北，2012）において初期貯留による汚濁負荷削減の効果が大きいことは明らかのため、本研究では緊急排水操作による浸水リスクの評価及び初期貯留による負荷削減効果を評価する。次節以降、入力降雨として流域全域の平均降雨を用い解析を行う。また本研究では降雨予測における絶対誤差  $E_a$  および降雨予測誤差(相対誤差)  $E_r$  を下式のように定め、これに基づいて評価を行う。

$$E_r = \frac{R_p - R_o}{R_o} \quad (3.1)$$

$$E_a = R_p - R_o \quad (3.2)$$

ここで  $R_o$  は観測降雨値、 $R_p$  は予測降雨値である。降雨予測誤差が大きいと予測が過大であることを示し、降雨予測誤差が負になると予測が過小であることを示す。立川・小松・寶（2002）は移流モデルを用いて予測降雨場の誤差構造のモデル化について研究し、この誤差の頻度分布の下限値が-1 の対数正規分布に近い分布形状を示すことを明らかにしている。降雨予測誤差の比較は、ピークカットを行う地点

（第4 向陽小学校付近）を最南端とした  $3\text{km} \times 3\text{km}$  のグリッドの観測または予測降雨情報について行う。つまり、X と C1 については平均化を行った降雨情報で評価する。これは、ピークカット地点流量に基づいて緊急排水の開始を決定するため、これより上流側の降水量の推定・予測が重要であること、また、同一のグリッドサイズに各レーダー観測情報をまとめることで解像度の異なるレーダーごとの降雨情報の比較を行うためである。現在時刻と 10 分前、20 分前の観測データから移流モデルを用いて予測した 1 時間先までの 10 分毎の予測情報をもとに緊急排水操作を行うかを決定する。ピークカット貯留を行う河川流量限界値  $Q_{in}$  は  $40\text{m}^3/\text{s}$  とした。

本研究では対象領域周辺の降雨情報を考慮することにより、実際には対象領域に到達する降雨域が対象領域外に移流すると予測される場合を含めた予測降雨情報を利用して雨水貯留施設の実時間制御を実施することによる浸水リスク削減効果を検証する。Fig.4 に示すように、注目する各グリッドの周りがあるグリッドを“周辺領域”とし、周辺領域を直上グリッドと周囲 1 つ分のグリッドの計 9 個のグリッドで検証する場合は以下周辺領域 1、直上グリッドと周囲 2 つ分のグリッド計 25 個のグリッドで検証を行う場合を以下周辺領域 2 と呼ぶ。3 章以降では同様に周辺領域 12 段階までの領域を解析対象とする。

また Fig.5 に示すように直上グリッドを中心にして周辺領域の予測降雨情報を選択する 4 つの方法について比較解析する。その方法とは、①対象領域グリッド直上のデータを流域平均降雨として用いる場合（これまで採用してきた降雨データ、以下中心値選択と呼ぶ）、②周辺領域を含めた 9 グリッド平均降水量を流域平均降雨として用いる場合（以下平均値選択）、③周辺領域を含めた 9 グリッドの最大値を流域平均降雨として用いる場合（以下最大値選択）、④周辺領域を含めた 9 グリッドの最小値を流域平均降雨として用いる場合（以下最小値選択）である。

本研究において浸水リスクが改善するとはこれまで採用してきた方法（中心値選択）より浸水する可能性が低くなることである。この浸水リスク指標として緊急排水リードタイム（実際のピークカット開始時間－予測降雨情報に基づく緊急排水開始時間＝緊急排水操作余裕時間）及び初期貯留残存量を用いる。緊急排水リードタイムは 30 分以上確保すれば確実に緊急排水が完了し、より長時間である程余裕を持った緊急排水の実施ができるため浸水リスクは低い。逆に初期貯留残存量はピークカット貯留の容量制約となるため、少ないほど浸水リスクは低いと言えるが、本研究では初期貯留残存量が 0 の場合は

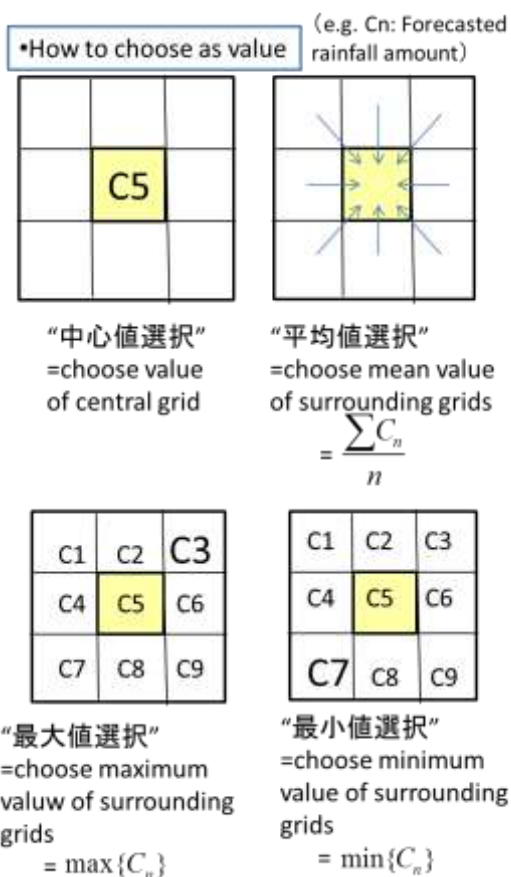


Fig.5 How to choose as value



RTC を導入しない場合と同等であることを考慮し、ピークカットを行う事例において少しでも存在した場合は RTC 導入不可能と判断する指標とした。

### 3.2 CバンドレーダーとXバンドレーダーの降雨推定・予測精度の比較

まず、CバンドとXバンド情報の基本的な差異である時空間分解能が、雨水貯留施設の実時間制御に及ぼす影響について降雨推定精度の観点から検証した。

アメダス観測地点である長岡京(10分間雨量)および国土交通省の桂観測所(時間雨量)における観測雨量とその直上のグリッドでのレーダー雨量とを比較し、それぞれの絶対誤差と相対誤差基準に基づいて算出した (Table.1)。平均については解析対象時間全体の平均、観測・推定降雨強度の双方が0の場合を除いた平均、観測降水量ピーク時刻までの平均、および降雨推定が過小(マイナス)であった時間のみの平均に場合分けした。

解析対象事例に限られているため全体を通して一貫した特徴は明確ではないが、C3は他に比べて誤差が大きく、特に誤差の標準偏差が大きい値を示しており、推定精度のばらつきが大きい。例として2012

年07月03日(Fig.6)の雨量グラフを比べるとC3は観測降雨の時間変動を再現できていない。また、C1とX250の降雨推定精度の差異は明確ではなかった。次に、レーダーごとの空間解像度の違いを考慮して、地上観測点を含む代表空間(C3のグリッドサイズである3km×3km)における3つのレーダー情報の推定精度の比較を行った。つまりX250は観測地点のあるグリッドを中心とする144個分のグリッド、C1も同様に9個分のグリッドを平均化した。この場合も、C3の誤差が大きく、C1,X250の推定精度に有意な差異は得られなかった。評価を地上観測点を含む代表領域(3km×3km)に統一し、平均化することでX250とC1の誤差、特にX250の誤差が全体として小さくなる傾向が見られ、降雨推定精度が改善された。

雨水貯留施設の実時間制御実用化のためには降雨推定の過小評価を避けて、より安全領域での操作を実施することが重要である。そのため降雨予測期間内で過小となった期間のみを抽出し推定精度を評価した。X250において他項目ではC1、C3より劣っている降雨事例でも、過小評価期間に限ると推定精度が優れている場合があり、また全体的に過小傾向が小さく絶対誤差平均で過小になった事例はないなど

Table.1 Comparison of rainfall estimation by absolute and relative error at observation place

O.U.-Only underestimation			Nagaokakyo			Katsura		
date	mean	condition	x	c1	c3	x	c1	c3
20120703	Absolute error	Except 0	0.1206	0.06177	0.2664	0.3691	0.2463	1.362
		until peak	0.2556	-0.1417	-0.1105	0.6327	0.3979	2.724
		O.U.	0.2946	-0.2279	-0.2175	0.8241	0.5417	2.879
	relative error	until peak	-0.6155	-0.8592	-1.777	-1.925	-0.8547	-1.975
		O.U.	0.2091	-0.0759	0.4374	0.3574	0.153	2.026
		until peak	0.2974	-0.077	0.3946	0.5259	0.2962	2.212
O.U.	-0.4325	-0.6376	-0.6303	-0.7375	-0.3546	-0.6341		
20120721	Absolute error	Except 0	0.0197	0.05863	0.1684	0.5365	1.338	-0.0597
		until peak	0.09389	0.5472	1.268	1.609	3.745	-0.2386
		O.U.	0.1815	0.6631	1.421	2.382	6.013	-1.321
	relative error	until peak	-0.6563	-0.275	-0.9576	-2.2	-6.846	-4.198
		O.U.	0.5711	0.05778	0.5574	0.2222	0.4029	0.3668
		until peak	-0.7292	-0.55	-0.3996	-0.6308	-0.7633	-0.7845
O.U.	0.06881	0.00857	0.04305	1.076	0.0974	1.105		
20120930	Absolute error	Except 0	0.1438	-0.0239	-0.0655	1.291	0.1948	1.895
		until peak	0.09815	-0.0752	-0.2163	1.158	-0.1965	1.208
		O.U.	-0.3037	-0.4267	-0.5501	-0.5417	-1.813	-0.7327
	relative error	until peak	0.1795	0.03724	0.1274	0.4764	0.02333	0.5157
		O.U.	0.123	-0.0191	0.00472	0.2693	-0.1246	0.1002
		until peak	-0.2524	-0.2978	-0.3024	-0.5417	-0.4199	-0.2083
Standard variation								
20120703	absolute error		0.5961	0.8064	0.8015	3.207	6.542	1.754
	Relative error		0.8732	1.219	0.9505	0.8891	1.249	1.367
20120721	absolute error		0.2428	0.314	0.7925	1.652	1.061	2.128
	Relative error		0.3793	0.7078	1.202	0.5763	0.4256	0.9415
20120930	absolute error		0.2891	0.3215	0.4466	1.101	0.9479	2.558
	Relative error		0.5568	0.4987	0.6637	0.8068	0.5755	2.613

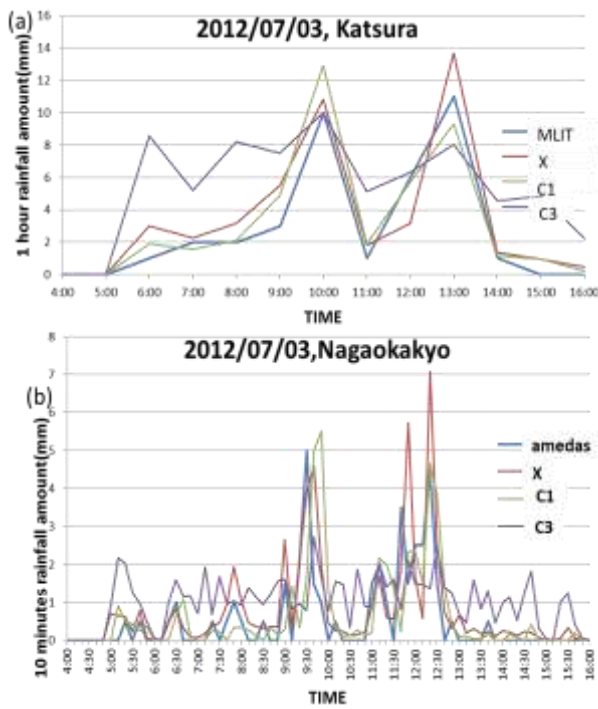


Fig.6 Comparison between rainfall amount of RADAR and surface observation

X250 のレーダー降雨データを用いることは雨水貯留施設の実時間制御実用化のための降雨情報として適していると考えられる。しかし、降雨推定精度の視点のみでは X250 と C1 との差は小さいので、以後これらを利用した雨水貯留施設の実時間制御における有効性の評価を行う。

次に、アメダス長岡京地点を中心とする 3km×3km 内のグリッドにおける比較(X と C1 は平均化)により予測精度解析を行った。アメダスの降水量データと移流モデルにより得られた予測降雨データとの比較を行った結果が Table.2 である。事例は長岡京付近で強雨が観測された 2012 年 07 月 03 日, 2012 年 09 月 30 日, 2012 年 10 月 17 日の 3 事例を用いた。Table.2(1)

Table.2 Mean of all predicted rainfall until 1 hour ahead

	Mean until 1 hour ahead	Absolute error	relative error
X	2012/7/3	0.049	-0.248
	2012/9/30	0.035	0.131
	2012/10/17	0.158	0.0512
C1	2012/7/3	0.026	-0.252
	2012/9/30	0.0089	0.114
	2012/10/17	-0.00161	0.09
C3	2012/7/3	0.366	0.428
	2012/9/30	0.133	0.261
	2012/10/17	0.277	0.83

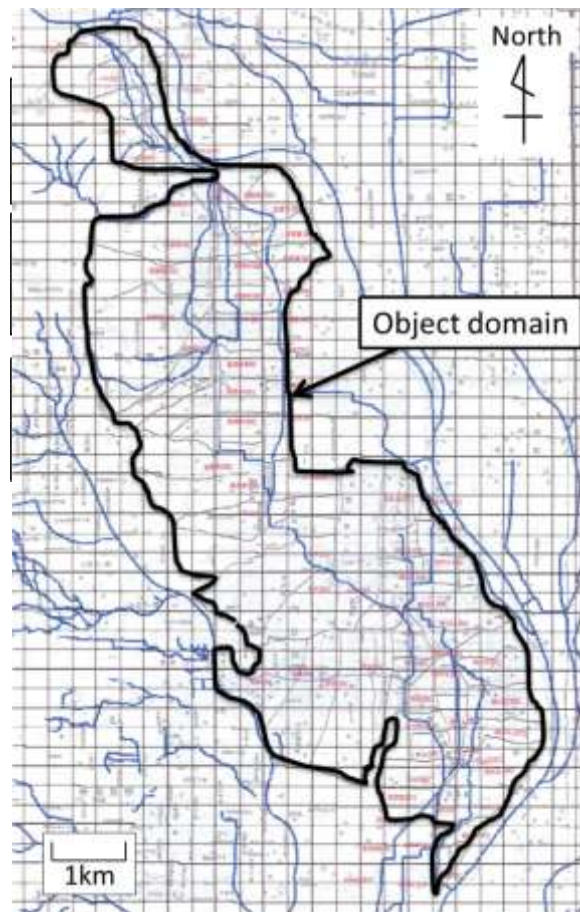


Fig.7 Relationship of Target area with X-band RADAR grids

では現時刻から 1 時間先までの 10 分ごとの絶対誤差・相対誤差を算出し、これを 1 時間おきに解析して 1 日の平均をとった。一方 Table.2(2)では、本研究で用いるのは 1 時間先の予測のみであるためこのデータのみ抽出し 1 日の平均をとった。その結果、X および C1 の予測精度が C3 に比べ優れており、また C1 よりも X の方が過小傾向が小さいことがわかった。C3 予測誤差の日平均は全て正であり過大予測であることは評価できるが、前述の推定精度を考慮するとピーク付近以外での過大予測が 1 日平均に大きく影響していると考えられるため、X および C1 の利用が適当であると考えられる。

### 3.3 データの流域分布による精度評価

本節では、空間解像度が細かいレーダー降水量データを利用することが流出予測へ与える影響について検討する。そのために対象領域におけるレーダーのグリッドを対象領域地図上に表し（例として Fig.7 に X バンドレーダ格子と流域の対応を記した）、グリッドと支流ブロックの対応を表にまとめた。グリッドがほぼすべて支流ブロックに含まれている場合は 1、一部分が含まれている場合は

0.5 の重みを与えた平均雨量を入力降雨として流域ブロックごとに与えた. このようにデータを流域ブロックごとに対応させ流域へ分布させることを本研究では”流域分布”と呼ぶこととする. また”流域平均”は対象領域全域の平均降雨を入力降雨として解析した場合を表す.

まず, 2012年9月30日の降雨事象を対象として流域平均降雨を用いた解析結果を Fig.8 に示す. C3 よりも C1 が, C1 よりも X が流量の立ち上がりが急激かつ最大流量も大きく, 空間解像度が高いことは雨水貯留施設の実時間制御を行う上でより早期の緊急排水操作開始のための情報となりうる点で有利である. 次に流域分布を与えたことによる流量の変化を 2012年07月03日と 2012年07月21日, および 2012年09月30日の3つの降雨事例の観測データを入力降雨としてピークカット地点(Fig.9)と初期貯留地点(Fig.10)の2カ所の流量で評価を行った. 全てピークカット地点と初期貯留地点いずれの流量も差異があり, 2012年07月12日および2012年09月30日においてはピークカット地点の流量は流域分布の方が大きく, 初期貯留地点の流量は流域平均の方が大きかった. 2012年07月03日の事例では逆の結果となった. 各降雨事例の最大降雨発生時刻の降水量レーダー画像(X)を Fig.11 に示す. 2012年07月03日事例ではピークカット地点以外にも下流部で強雨域が見られ, 他2事例ではピークカット地点付近でのみ強雨域が見られる. 流域分布によりこれらの雨域分布を流量推定に反映できたと考えられる. ピークカット地点で大きく差がみられた07月21日の降雨は, 上流部と下流部との雨域の偏りが大きく, かつ流下方向と雨域の移動方向がほぼ同じ事例であり, これらの作用により流域分布を与えた場合の流量が一層大きく算出された. 例と

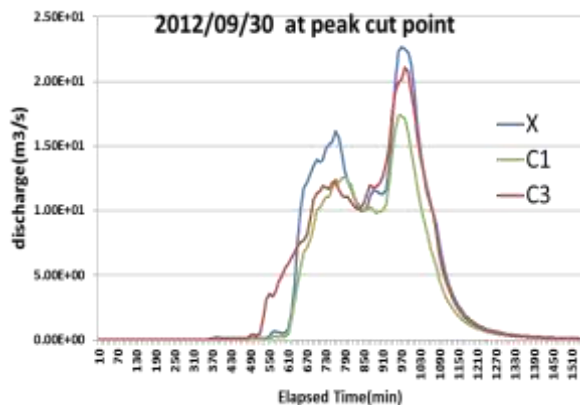


Fig.8 Discharge change of each Radar data

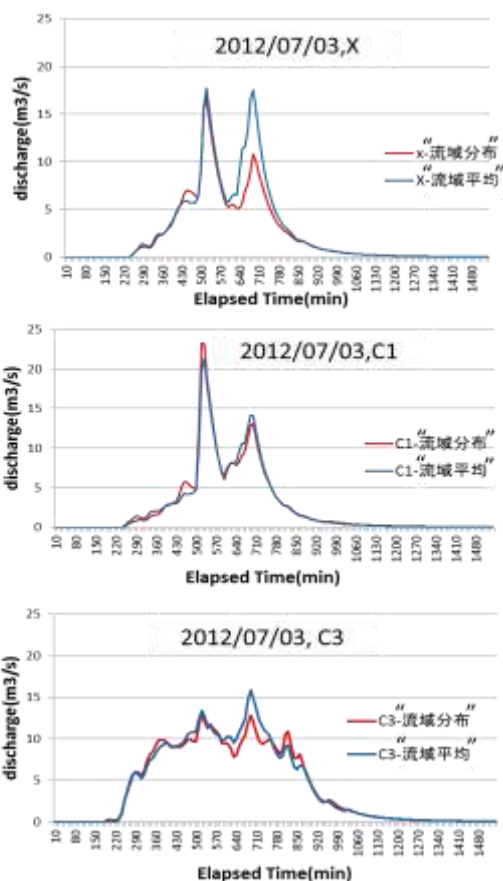


Fig.9(1) Discharge change of “流域分布”, “流域平均” at peak cut point (2012/07/03)

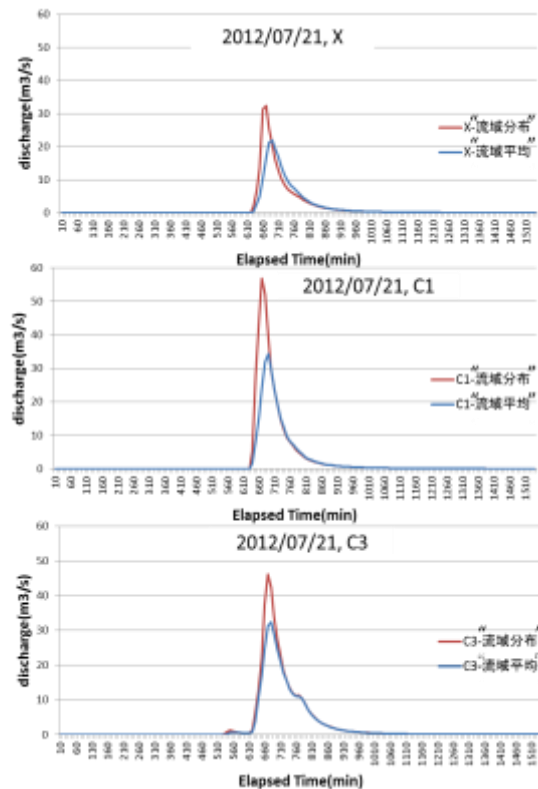


Fig.9(2) Discharge change of “流域分布”, “流域平均” at peak cut point (2012/07/21)

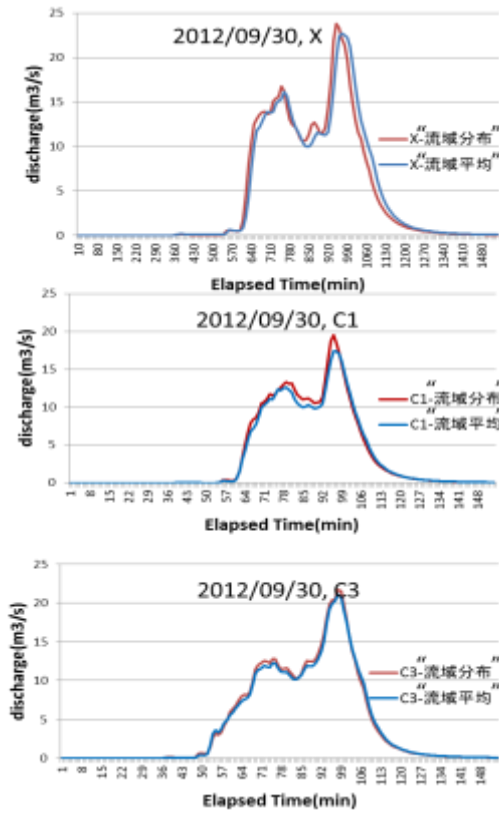


Fig.9(3) Discharge change of “流域分布,”“流域平均” at peak cut point (2012/09/30)

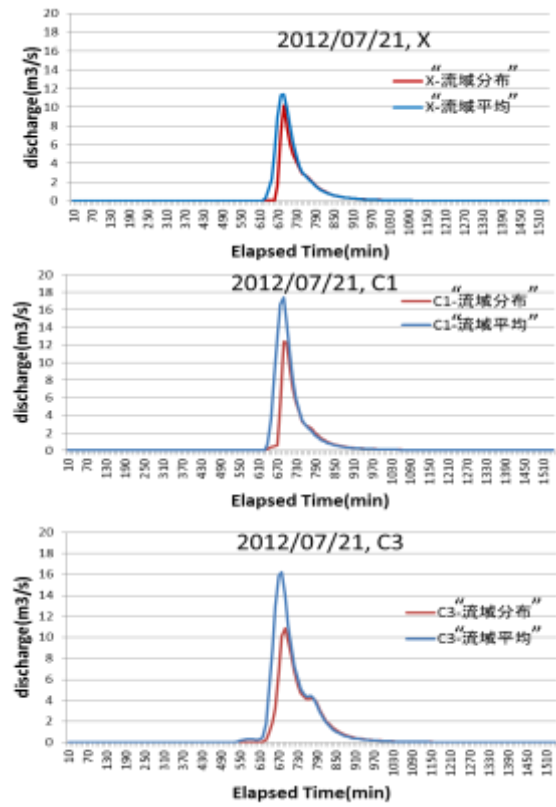


Fig.10(2) Discharge change of “流域分布,”“流域平均” at beginning storage point (2012/07/21)

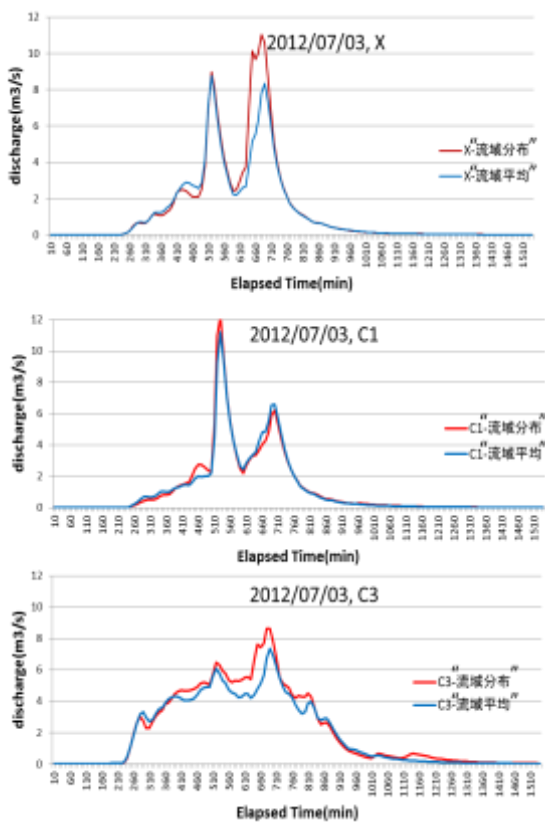


Fig.10(1) Discharge change of “流域分布,”“流域平均” at beginning storage point (2012/07/03)

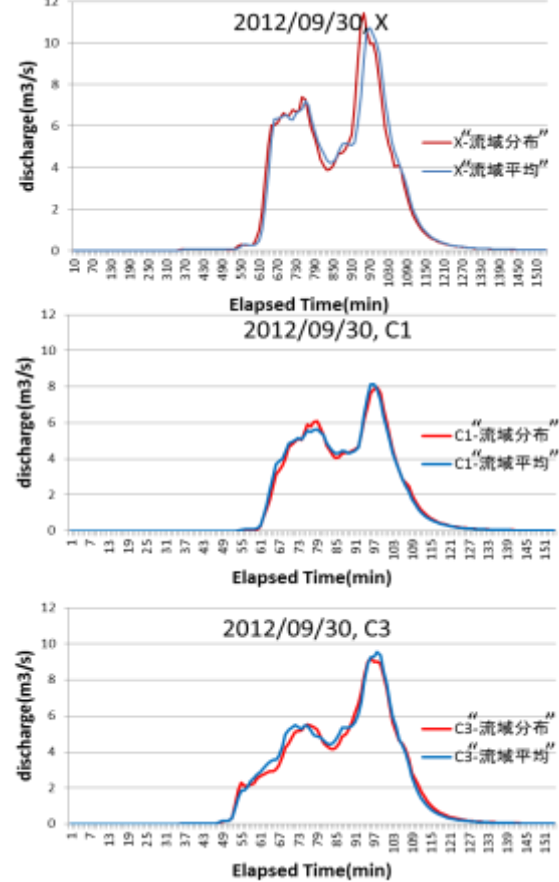


Fig.10(3) Discharge change of “流域分布,”“流域平均” at beginning storage point (2012/09/30)

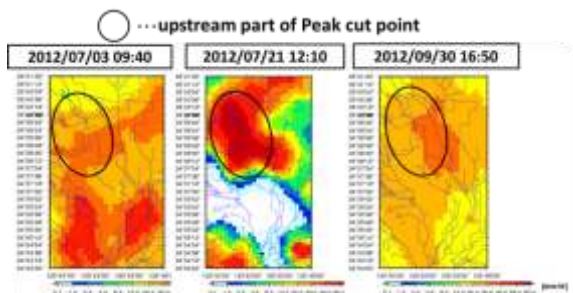


Fig.11 X-band RADAR picture of 3 rainfall events when rainfall intensity reaches a peak

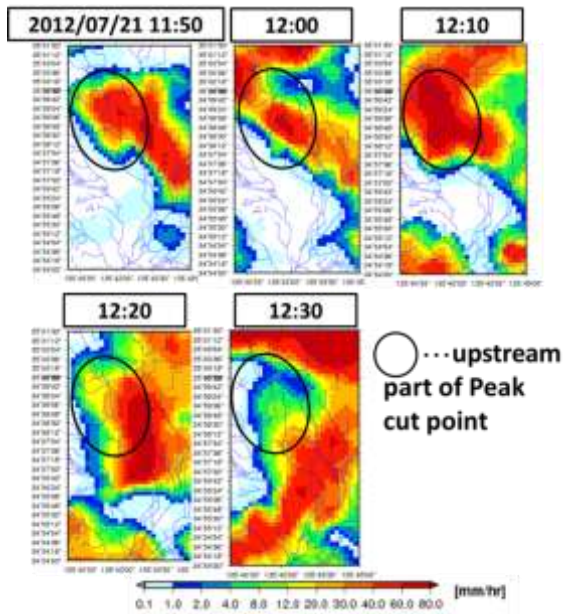


Fig.12 C-band RADAR pictures around peak time of rainfall intensity

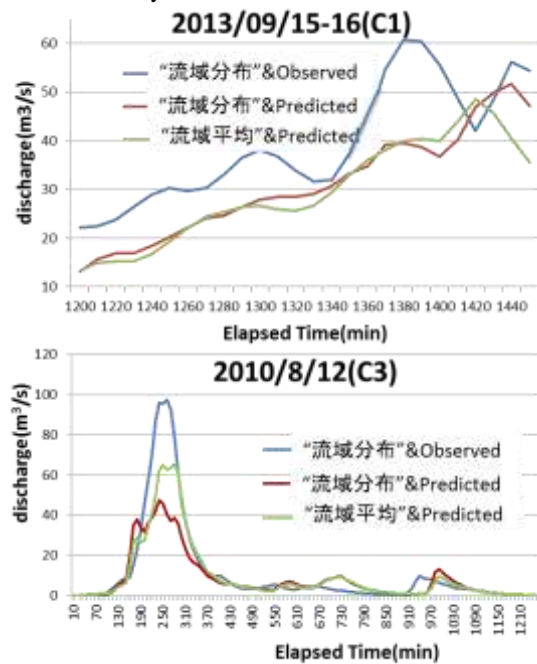


Fig.13 Hydrograph of events that lead time of emergency drainage declined

してピーク時刻付近のレーダー画像(Fig.12)を見ると雨域の偏りおよび雨域の移動が見られる。一方、初期貯留地点は枝川集水域が小さく、降雨分布によってその領域の雨量を的確に与えることができているため、流域平均雨量のヒドログラフとは異なる結果が得られた(Fig.10)。

以上、高空間解像度のレーダー情報の利用により、比較的小さな流域でも降雨空間分布の影響を表現できることが確認できたので、今後、X,C1,C3 それぞれの観測データの空間解像度に基づいて降雨の流域分布を考慮した流出解析結果を真値として採用し、予測降雨を用いた実時間制御の評価に用いる。

次に、予測データに対し流域分布させた場合に浸水リスクに与える影響の比較を行った。浸水リスク指標として緊急排水リードタイムを使用し、ピークカットが行われる降雨事例を用いて検証した。Xでは2事例で緊急排水リードタイムが増加、C1では緊急排水リードタイムが増加する事例が2つと減少した事例が1つ、C3では1事例で増加し1事例で減少という結果になった。

緊急排水リードタイムが流域分布により減少した事例のピーク時刻付近の流量(ピークカット地点)をFig.13に、予測降雨の最大降雨強度発生時刻のレーダー画像をFig.14に示した。これらの事例に共通するのは、予測降雨においてピークカット地点より下流部に強雨域があり上流部に強雨域がない、あるいは上流部より下流部の方が強いと予測されていることである。これにより流域分布を与えることで流量

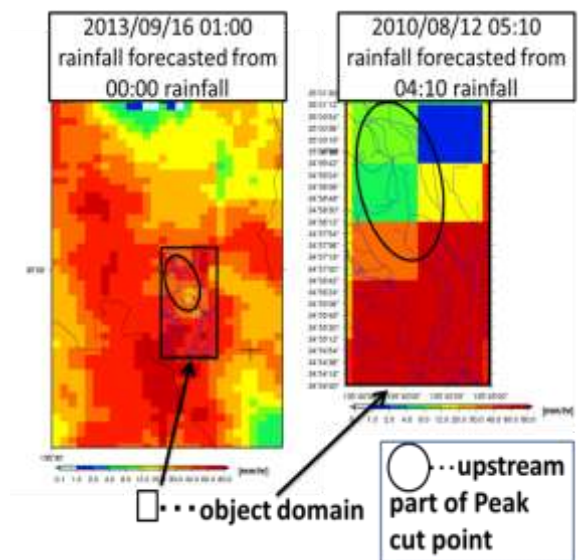


Fig.14 Left: C-band RADAR picture(grid 1km) when Forecasted rainfall intensity reaches a peak  
Right: C-band RADAR picture(grid 3km) when Forecasted rainfall intensity reaches a peak

予測が過小となっている。このような事象は緊急排水操作の開始を遅らせ浸水リスクを増大させる危険性が高く、これを回避するためには予測降雨域の偏りを考慮し、対象領域周辺の予測降雨情報を活用することが必要である。次節以降、このような予測降雨情報の活用方策について検討する。

### 3.4 対象領域周辺の予測降雨情報を用いた場合の降雨予測誤差の評価

本節では、降雨予測誤差(3.1式)を用いて周辺領域を考慮した予測降雨情報の選択方法の評価を行う。施設制御に大きく影響するピークカット地点上流の3km×3kmの範囲を解析対象とする。

まず C3 データを用い、対象領域直上グリッドを中心に計9つのグリッド(周辺領域1)からで3.1で示した4つの選択方法について2009年07月21~22日、2010年08月12日の2事例で解析を行った。前者は緊急排水・ピークカットはされたが浸水は起こらなかった事例、後者は緊急排水・ピークカットは行われたものの浸水が起こった事例である。最大降雨強度までの降雨予測誤差を解析したところ、C3の空間解像度が3kmであることから、広く周辺領域を考慮に入れているため、中心値選択との偏差の絶対値が非常に大きくなった。中心値選択と平均値選択と比較すると、平均値選択の方が最大降雨強度時刻までの降雨予測誤差を少し過大評価しているが明確に実時間制御の上で有利であるとは断言できないものとなった。最大値選択の場合、中心値選択に比べ降雨予測誤差平均は降雨強度閾値を設定しない場合で60%~220%程多くなった。特に過小予測だったものが過大予測になったケースがあり、評価に値するといえる。最小値選択の場合は当然のことながら大きく過小に予測し、選択方法として全く適さないことが明白であるため、今後の解析対象から除外する。

次にXおよびC1情報で周辺領域を考慮した場合について検証をおこなった。ここではX、C1と異なるそれぞれの大きさのグリッドで周辺領域を考慮した情報選択を行い、それを対象領域直上の3km×3km領域に対して適用した。つまり、Xの周辺領域1とは周囲250m、C1の周辺領域1とは周囲1kmを考慮に入れるということであり、その上で3つのタイプのレーダー予測雨量情報の選択方法の比較検討を同じ領域範囲の雨量として評価するため、3km×3kmに平均した。具体的には周辺領域を含む計9個のグリッドで検証する場合(周辺領域1)と、周辺領域を含む計25個のグリッドで検証を行う場合(周辺領域2)の2パタ

ーンについて、前節で示し採用した3つの予測雨量値の選択パターン(中心値選択、平均値選択、最大値選択)について降雨予測誤差の解析をおこなった。事例は2012年07月03日を用いた。XもC1も、C3の解析に比べ降雨予測誤差変化の幅が小さく、中心値選択と平均値選択の差はごく小さい。またXでは周辺領域1の場合、最大値選択は中心値選択に比べ全時間平均で30%程度、最大降雨強度発生時刻までの平均で12%程度の過大評価となり、周辺領域2の場合はそれぞれ60%、25%の過大評価となった。周辺領域2では周辺領域1の2倍近い過大評価ができたと考えられる。C1では周辺領域1の場合、最大値選択は中心値選択と比べ全時間平均で約140%、ピークまでの平均で約60%の過大評価となった。周辺領域2ではそれぞれ約300%、約110%とこちらも2倍近い過大評価となった。

### 3.5 C1およびXレーダー情報の周辺領域を考慮した情報選択による浸水リスクの評価

本節では、流量予測に流域分布降雨を用いる場合についても、予測降雨情報として参照すべき周辺領域の範囲について検証した。その結果をFig.15に示す。ここでもC3レーダー情報の解析結果と比較するため、中心のグリッドから3km分離れたグリッドまでを考慮し、Xならば周辺領域12、C1ならば周辺領域3までを周辺領域範囲として、2012年09月3日と2013年09月15-16日の2事例について検証した。両事例ともにピークカットが起こったもので、前者は急激に発達して広い範囲に雨を降らした事例、後者は台風18号の影響で強雨域が非常に大きい事例である。

Xでは、周辺領域を拡大して平均値選択をとった場合、緊急排水リードタイムはほぼ変わらず、ピークカット地点の流量変化も小さかった。2013年09月15-16日事例では周辺領域1,2のみ緊急排水リードタイムが大幅に増加しており、予測降雨域が対象領域から少し離れた時に有効な手法である。しかし周辺領域3以降では逆に緊急排水リードタイムが大きく減るなど不確実性が高く予測降雨量が過小になる可能性も高い。各周辺領域の最大値選択の場合、緊急排水の目安となる $Q_{in}=40m^3/s$ に到達する時刻付近を拡大してみると(例:Fig.15(1)(c))、周辺領域1から2で予測流量が大きく増加し、以後は流量の時間変化傾向を維持しながら一定の割合で流量が増加した。このように、最大値選択の場合、周辺領域は広くとるほどより安全側で緊急排水操作が実施できる。今後、移流モデルを用いた降雨予測精度に基づ

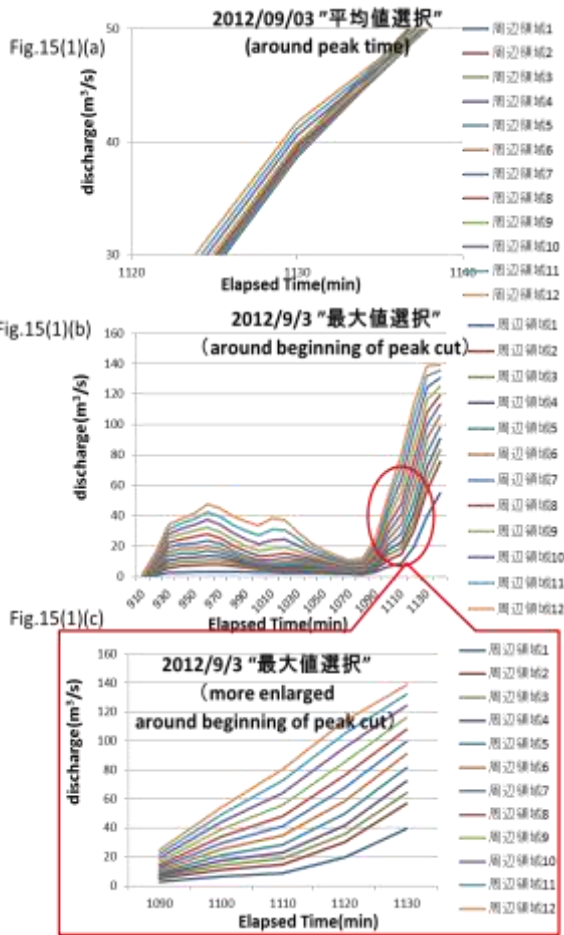


Fig.15(1) Verification what number of "周边领域" should be chosen(2012/09/03,X)

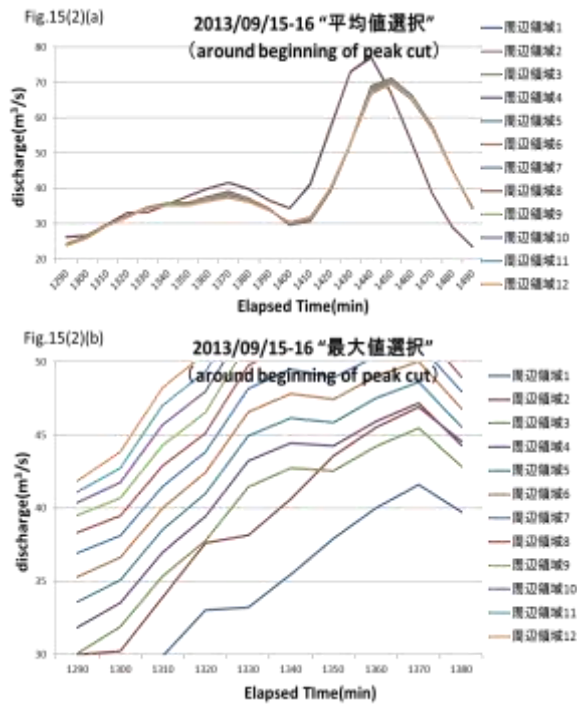


Fig.15(2) Verification what number of "周边领域" should be chosen (2013/09/15-16,X)

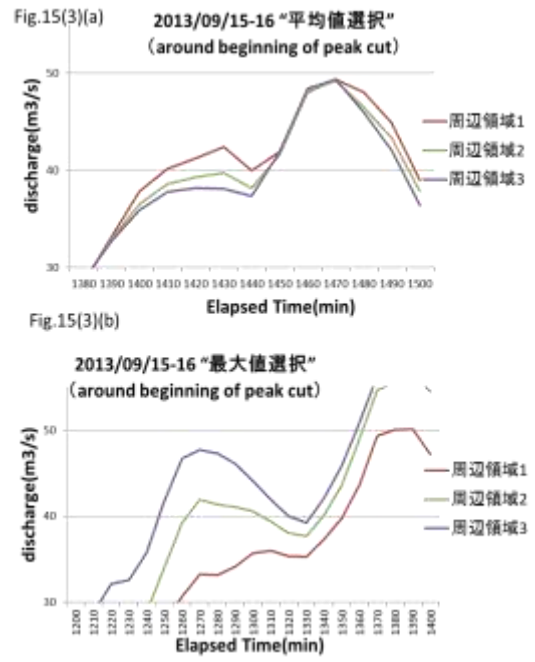


Fig.15(3) Verification what number of "周边领域" should be chosen (2013/09/15-16,C1)

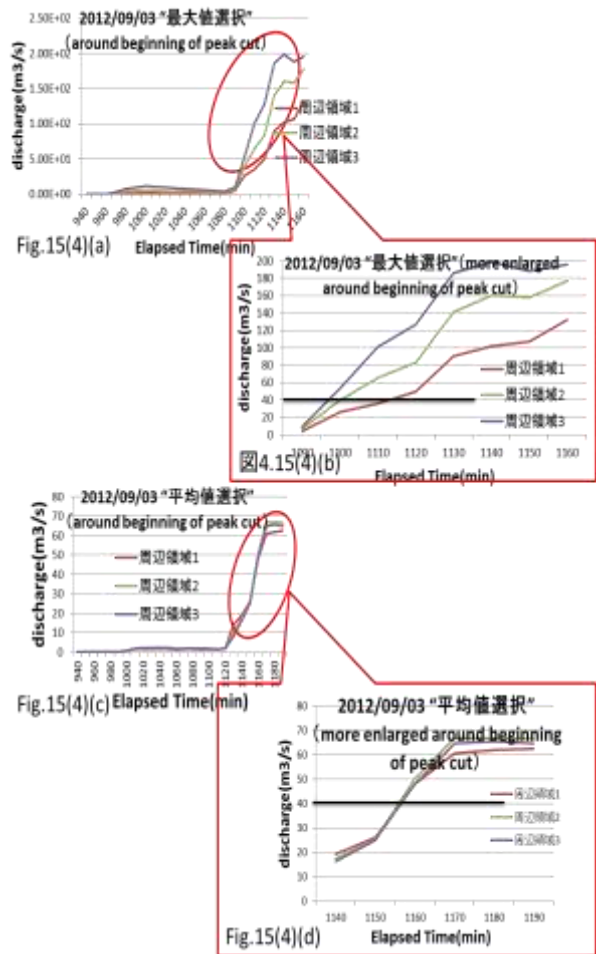


Fig.15(4) Verification what number of "周边领域" should be chosen (2012/09/03,C1)

Table.3 Heavy rain events

Katsura			Nagaokakyo(AMeDAS)			
Year	Month	Day	Max 1h rainfall (mm)	1 day rainfall(mm)	Max 1h rainfall (mm)	Max 10min rainfall(mm)
2011	5	11	13	121	26	6.5
	5	22	19	24	21.3	3.0
	5	29	15	93	13.5	3.5
	7	26	22	26.5	22	19.5
	8	21	20	13.5	9.5	6
	9	1	14	32.5	19.5	7
	9	4	16	70	14.5	3.0
	9	21	20	73.5	20.5	6.5
	10	14	11	66.5	12.5	3
	10	22	13	31.5	13	8
	11	19	13	71	15	3
2012	3	31	12	31.5	11.5	4
	4	3	22	53.5	37	19.5
	6	8	15	26.5	19	5.5
	6	22	14	35	10	3
	7	1	11	43.5	14	7
	7	3	11	39	16	5.5
	7	20	16	6	4.5	1.5
	7	21	19	5.5	5	3
	8	13	26	94	80	17.5
	8	16	26	37	34	23
	8	21	14	9	8.5	5
	8	23	45	3	2	1.5
	9	3	26	37	27	15
	9	9	4	33.5	18.0	12
	9	30	12	66	15.5	3.5
	10	17	14	39.5	17.0	11
	10	23	15	20	8.5	5
	11	17	12	40	10	4.5
2013	4	6	14	39.5	13	10
	4	30	12	18	11	4.5
	6	15	12	27	13.5	3.5
	6	19	14	70	14	3
	7	13	14	25	19.5	8.5
	7	14	19	5.5	2.5	2.5
	7	15	12	14.5	14	6.5
	8	6	16	29.5	19.5	9.5
	9	2	10	51	16.5	8
	9	3	7	19.5	19	11
	9	15	22	152.5	34	10
	9	16	42	142.5	40	11
	10	9	14	28.5	24	6
	10	24	7	11.5	9.5	4.5
	10	25	17	87.5	15	4.0

Color-filled cells: more than 15mm/hr

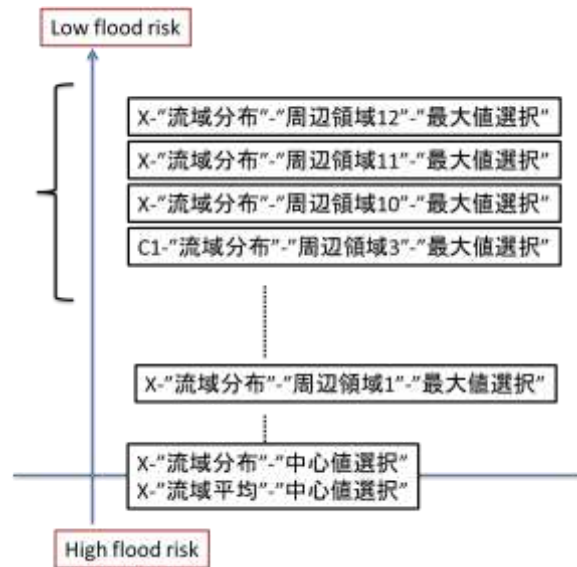


Fig.17 Low flood risk combination of application strategy

いて、より適正な周辺領域範囲の設定する必要がある。

C1 を用いた周辺領域の平均値選択の場合、どちらも周辺領域を広くとればとるほど流量が減少した。強雨域が周辺領域にあったとしても弱雨域の影響の方が大きかったと考えられる。最大値選択の場合にはどちらも周辺領域を広くとるほど流量及び緊急排水リードタイムが増加した。X と同様特に周辺領域 1 から 2 で大きく増加する傾向があった。

#### 4. 導入可能なレーダー予測降雨情報の活用方策

##### 4.1 浸水リスクの少ないレーダー予測降雨情報の活用方策の推定

前章の解析結果を踏まえて、本章で検討対象とするレーダー予測降雨情報の活用方策の組合せを検討する。(Fig.16)

まず地上雨量計との比較に基づく降雨推定精度評価結果では、X と C1 との差は小さく、降雨予測精度評価結果では精度面では C1 が、過大傾向は X が上回った。C3 は全平均では過大傾向が見られているが精度は悪く、細かい時間でピークを表現できない点を考慮して、本章では対象から除外する。

X, C1 は流域分布降雨を考慮することで、より流量ピークと流量の立ち上がりを的確に予測できる。さらに、流量予測に用いる降雨予測情報の周辺領域考慮の範囲を広げることで、より早期に緊急排水操作が実施でき、流域分布では反映できず流域平均で反映できた下部で強雨が予測された場合に流域分布も対応できる。ただし、周辺領域の拡大に伴って

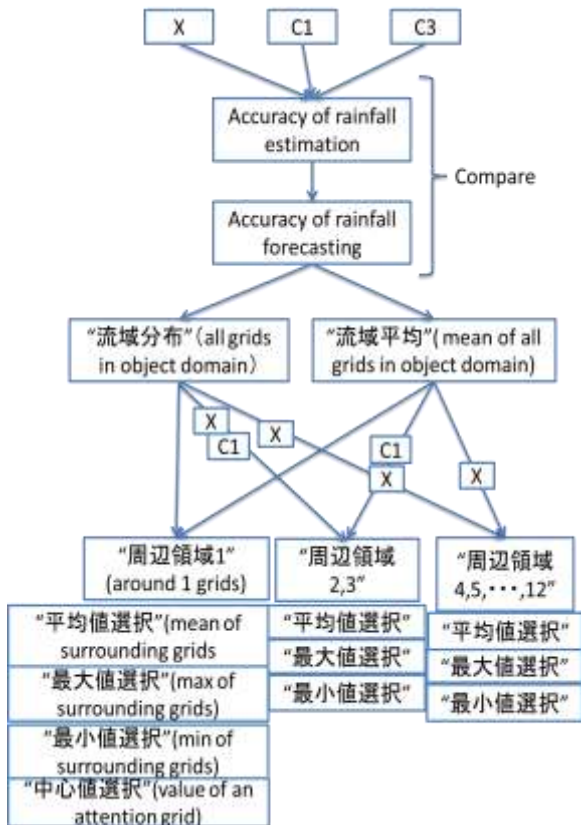


Fig.16 Combination of application strategy



Table.4 Max discharge from runoff analysis using Radar-observed rainfall & “流域分布”

Year	Month	Day	X Max Discharge(m <sup>3</sup> /s)	C1
2011	7	28	77.63	-
	9	4	25.04	-
2012	7	3	16.82	22.23
	7	21	32.4	56.7
	8	13	38.2	60.42
	8	18	23.1	28.76
	8	23	30.8	75.92
	9	3	48.36	40.72
	9	30	23.82	19.59
	10	17	20.02	25.15
	10	23	31.3	49.62
	11	17	25.58	28.5
2013	7	13	24.66	56.25
	9	15-16	67.97	60.66
Number of peak cut events			7	7

予測流量が過大となり、緊急排水の空振りが発生する可能性は高まる。これらの結果に基づき浸水リスクの少ないレーダー予測雨量情報の活用方策の組合せについて定性的に評価した。その結果を Fig.17 に示す。なお Fig.17 では上から浸水リスクの小さい順に並べた。

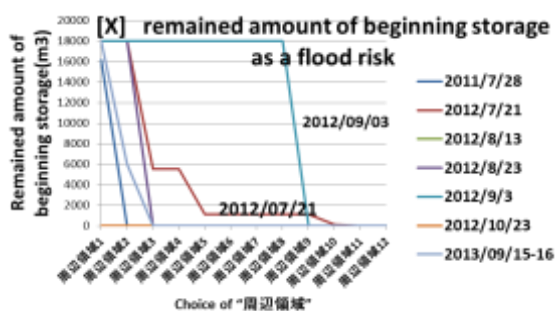


Fig.18(1) Flood risk change at each “周辺領域” on peak cut events

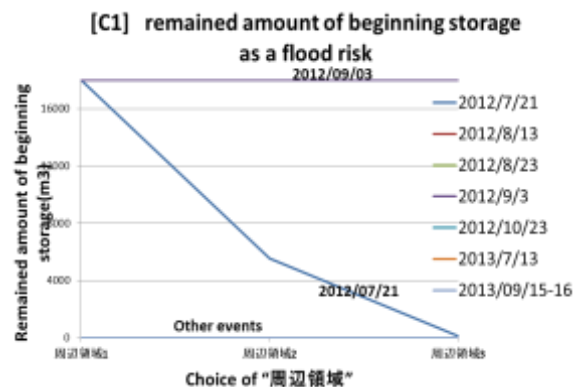


Fig.18(2) Flood risk change at each “周辺領域” on peak cut events

## 4.2 検証条件

2011~2013年の強雨事例をTable.3にまとめた。緊急排水とピークカット貯留が実施されることが予想される規模の降雨事例として、抽出基準を桂および長岡京いずれかの観測所で1時間降雨強度15mm以上と設定して事例を抽出し、さらに、レーダーデータが利用可能な事例を選択した。これらの事例では、ピークカット貯留を実施する判定基準 $Q_{in}$ を $40m^3/s$ とすると、緊急排水およびピークカットが実施される事例が少なく浸水リスクの評価ができない。そのため、観測データをそのまま用いて流域分布降雨を用いた解析最大流量 (Table.4) に基づき、仮想的に $Q_{in}$ を $30m^3/s$ と設定し、より多くの事例でピークカットあるいは緊急排水操作が行われるかどうかを検証できるようにした。また、Xレーダーによる観測情報を用いて流域分布降雨を与えた推定流量を真値として、ピークカット貯留の開始時刻および貯留水量・浸水量を評価する。

対象事例のうち、緊急排水が完全に実施された後、全施設容量を用いてピークカット貯留を実施しても、浸水が発生したのは2013年9月15~16日の台風18号の事例のみであり、他の降雨事例では初期貯留が残

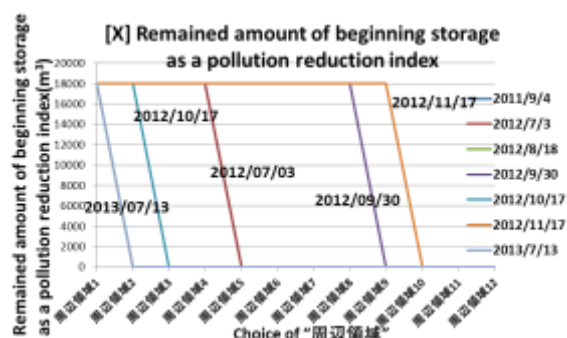


Fig.19(1) Pollution reduction index at each “周辺領域” on peak cut events

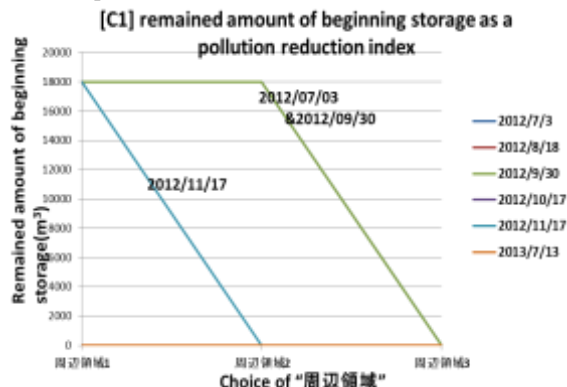


Fig.19(2) Pollution reduction index at each “周辺領域” on peak cut events

存しても、ピークカットに要する貯留容量が少なく、実際に浸水が発生するわけではない。ここでは、ピークカット開始時点の初期貯留残存量を浸水リスク指標及び汚濁負荷削減指標として用いて、XおよびC1レーダーの周辺領域情報の活用方策の評価を行う。行政が実時間制御を導入するには、実時間制御を行わない場合より浸水リスクが増大しない、つまりピークカットを行う事例において初期貯留残存量が存在しないことが条件である。その上で汚濁負荷削減効果を高めるためには、ピークカットを行わない事例において、できるだけ緊急排水を行わず初期貯留を確保する方策を提案する必要がある。

#### 4.3 検証結果

検証結果を Fig.18, Fig.19 に示す。Fig.18 は浸水リスクとして初期貯留残存量を縦軸に、最大値をとる周辺領域の範囲を横軸にし、Fig.19 は同様に汚濁負荷削減指標としての初期貯留残存量を用いた図である。X および C1 レーダー情報では、活用する周辺領域を拡大して最大値選択を行うほど予測流量が増加するとともに緊急排水リードタイムは長くなり、初期貯留残存量が少なくなる。特に、2012年07月21日の降雨事例では、X レーダー情報の周辺領域10およびC1レーダー情報の周辺領域3、2012年09月03日の降雨事例ではC1レーダー情報の周辺領域3を用いた最大値選択の方策でも、緊急排水が完全に終了せず、初期貯留雨水が残存するため、浸水リスクが増大した。この結果、実時間制御導入可能な浸水リスクを増大させない活用方策は、解析対象とした強降雨時にはC1では3km以上、Xでは2.5km以上の周辺領域の予測雨量情報を対象として、その最大値を用いて流量予測を行い緊急排水操作の実施を判断する必要がある。

解析対象の全ての降雨事例において、上述の浸水リスクを増大させない活用方策としてXレーダーの周辺領域10以上、C1レーダーの周辺領域3の最大値選択を用いた場合、適切に緊急排水操作が実施され、初期貯留残存量はゼロとなる。これらの事例における汚濁負荷削減効果はほぼゼロと評価されるが、今後時間雨量15mm以下の降雨事例についてもRTC実施の効果を検討し、汚濁負荷削減効果を含めた総合的評価を行うためのレーダー情報活用方策について検討ができた。

#### 5. 結論と今後の課題

本研究では、浸水対策を主目的として都市域に建設・整備されている雨水貯留施設を用いた汚濁負荷

削減を実施するために、レーダー予測降雨に基づく雨水貯留施設の実時間制御を行う上で、複数のレーダー予測情報を効果的に活用するための方策について検討を行った。

その結果、対象流域における地上観測雨量の推定精度ではC3に比べてC1、Xレーダー情報の推定精度が高く、予測流量の時間変動も大きく緊急排水操作を実施する上では有利であることが明らかとなった。また、C3レーダー情報でも解析領域一律の平均降雨を用いて流量予測をするよりも、流域分布降雨を与えた解析を実施することで緊急排水実施基準流量(Qin)に到達する時刻が早まり、緊急排水リードタイムが短くなる。分布型流出モデルを用いる利点が検証された。

降雨予測誤差を考慮した緊急排水操作を実施するための流量予測情報を作成するために、単純に予測雨量を定数倍するなどの便宜的な方法ではなく、移流モデルを用いて対象領域を含む周辺領域の降雨分布を予測し、それらの予測情報から流量予測に用いる情報を選択する方策について検討した。基本的に周辺領域内の最大値を用いて流量予測を行うことで、予測流量が増加し、緊急排水操作を実施する上でより安全側の判断となって浸水リスクは低減し、周辺領域を広げれば広げるほど一定の割合で予測流量は増加し浸水リスクも低減する。現状では約3km離れた地点まで考慮に入れる必要があるが、予測降雨精度が向上すれば、より周辺領域を狭くとるあるいは平均をとることで浸水リスクの改善が見込める。

予測は移流モデルの精度に大きく依存しており、XおよびC1レーダーを用いた降雨予測のために、移流ベクトル算定範囲の修正による移流モデルの改善を行ったが、降雨予測モデルの改善は不十分であり、より一層のモデル改善を行うべきである。降雨予測モデルの改善により、上述の参照すべき周辺領域の範囲をより適切に評価することが可能となる。さらに、Xレーダー情報の時間解像度が小さいことを考慮すれば、より適切な予測降雨情報の活用方策を検討できる。

また、本研究の解析対象とした降雨は強降雨事例のみであり、緊急排水操作の空振りを減少させ、汚濁負荷削減効果を高めるための検討は行っておらず、より多くの降雨事例および複数年間を通じた統計的な評価を行い、降雨予測精度を考慮した総合的な浸水防止と汚濁負荷削減効果の評価を行う必要がある。

## 謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金（基盤(C):課題番号24560662）の支援を受けた。また水文観測・調査にあたり京都府文化環境部の協力を得た。記して謝意を表す。

## 参考文献

城戸由能（2008）：西羽東師川流域の水文・環境観測と水・汚濁負荷流出解析，京都大学防災研究所年報，Vol.51(CD-ROM)，pp.549-564.  
金泰成・山田淳・文亨夫（2000）：雨水貯留施設による雨天時ノンポイント流出汚濁物のリアルタイム制御，環境システム研究論文集 Vol.28，pp.105-113.  
椎葉充晴・高棹琢馬・中北英一（1984）：移流モデルによる短時間降雨予測手法の検討，第28回水理

講演会論文集，第28巻，pp423-428.

立川康人・小松良光・寶馨（2002）：移流モデルによる予測降雨場の誤差構造のモデル化と降雨場の発生，京都大学防災研究所年報第45号，B-2.  
鳥井宏之・城戸由能・中北英一（2011）：降雨予測誤差を考慮した雨水貯留施設の制御戦略に関する研究，京都大学防災研究所年報，Vol.54，pp.431-455.  
中村航・城戸由能・中北英一（2012）：レーダー予測降雨を用いた雨水貯留施設の実時間制御による浸水防止と汚濁負荷削減に関する研究。  
和田安彦・尾崎平・村岡基（2006）：下水道施設のリアルタイムコントロールによる合流式下水道改善に関する研究，土木学会論文集 G Vol.62 No.1，pp.201-210.

（論文受理日：2014年6月11日）