

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2012～2014  
 課題番号：24560662  
 研究課題名(和文) レーダー降雨予測の不確実性を考慮した雨天時汚濁負荷削減のための雨水貯留施設制御  
  
 研究課題名(英文) Real Time Control of Urban Stormwater Storage System for Non-point pollutants Reduction by Using of RADAR Precipitation Forecasting  
  
 研究代表者  
 城戸 由能 (KIDO, Yoshinobu)  
  
 京都大学・防災研究所・准教授  
  
 研究者番号：50224994  
  
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、近年導入が進められている高解像度で短い時間間隔で観測可能な最新型X-bandレーダーの観測データを用いた降雨予測手法の精度向上を図り、予測降雨に基づいて浸水防止と汚濁負荷削減の両目的を達成するための雨水貯留施設の操作ルールを検討した。降雨初期の高濃度汚濁雨水を一定量まで貯留し、その後、対象領域を中心とした周囲の予測降雨情報を活用した流量予測を行い、緊急排水操作の開始を判断する実時間制御を評価した。その結果、緊急排水が完了し、浸水対策用の貯留容量を圧迫することがなく、浸水リスクを増大させることなく初期貯留による汚濁負荷削減の効果が得られることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In this study, precipitation forecasting accuracy was improved by using the observation data of the latest X-band RADAR with high temporal and spatial resolution. It was used for stormwater runoff prediction and real time control of stormwater storage system for both objectives the flood prevention and pollution runoff reduction. The operational rule has three steps below. 1) The first-flush stormwater including a high concentration pollutant is stored until the set-point storage capacity. 2) The rainfall-runoff observation and prediction are continued, and if heavy rainfall comes to the target basin, first-flush storage stormwater should be quickly pumped out. 3) The storage system starts the flood prevention operation by using of remaining capacity when heavy rainfall comes. As a result, utilization of rainfall forecasting information surrounding around the target basin can drain out all of first-flush storage and can supply adequate flood control capacity.

研究分野：環境工学

キーワード：都市雨水排除 ノンポイント負荷削減 レーダー降水量 予測精度 雨水貯留施設 緊急排水操作 実時間制御

### 1. 研究開始当初の背景

都市化に伴う不浸透域の拡大および速やかな雨水排除を優先するシステム整備が雨水流出量ピークの増大や流達時間の短縮化を招くとともに、都市域への人口や生産基盤の集中、産業構造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の変化が水害ポテンシャルを増大している。このような都市化に伴う水害は「都市型水害」と呼ばれ、内水氾濫および都市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。一方、下水道等の汚水処理システムの普及により家庭や工場等の特定汚染源 (Point Source) 由来の汚濁負荷削減が進み、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。また、合流式下水道越流水 (CSO: Combined Sewer Overflow) による都市河川水質汚染については 1980s 以降対策がとられてきたが、計画降雨規模以下でも頻発するため現在でも問題となっている。さらに、都市化に伴う大気汚染物質由来の微量有害物質等を含む多様な非特定汚染源 (Non-point Source) 由来の汚濁負荷については根本的な削減対策がとられなかった。

これらの要因により、多くの都市河川の水質改善は 1990s 以降鈍化している。これは非特定汚染源からの汚濁負荷が降雨初期に集中して流出する、いわゆるファーストフラッシュ現象による水質悪化への影響が相対的に大きくなっていることがひとつの要因である。

このような状況のもと、都市型水害あるいは汚濁負荷削減を単独で目的とする雨水貯留施設が主要都市域に建設されている。ともに貯留槽と排水施設等で構成された類似のシステムであるが、それぞれの目的のもとで運用されるため、前者については数年に 1 度程度の稼働率であり、後者では浸水防止効果は小さい。そこで、浸水防止目的で建設された雨水貯留施設を活用してファーストフラッシュ現象による高濃度汚濁水を貯留し、下水道システム等により処理した後に公共用水域に放流することで、非特定汚染源からの汚濁負荷を積極的に削減することが検討されてきた。ただし、浸水防止目的のための貯留容量を事前にかつ確実に確保する必要があるため、両目的を同時達成するための運用方法として、降雨予測および流量予測に基づいて貯留施設の貯留・排水操作を行う実時間制御 (RTC: Real Time Control) が必要となる。

### 2. 研究の目的

晴天時に流域の地表面に堆積した非特定汚染源からの汚濁負荷 (ノンポイント負荷) が、降雨初期に特に高濃度で流出し、河川や湖沼の汚染源となっている。この初期雨水を、都市域の浸水防止目的で整備されている雨水を貯留するための大規模なトンネル等の施設を活用して貯留・処理すれば、施設の運用効果が増えるとともに、効率的な水質保全

が可能となる。しかし、同一施設において両目的を達成するためには浸水被害をもたらす豪雨が予測された場合に汚濁負荷削減目的で貯留した初期雨水を速やかに排水して浸水防止を目的とした流量ピーク時の貯留に備えるための緊急排水操作を導入する必要がある (図 1)。近年、より高解像度・短時間の降雨観測が可能な最新型 X-band レーダーが主要都市部に整備されるとともに、その観測データを用いた降雨予測手法の精度向上が図られており、これに基づく雨水貯留施設の操作ルールを作成することを本研究の目的としている。京都盆地西部を流下する一級河川西羽束師川流域 (図 2) を対象流域とし、当該流域で現在建設中の雨水貯留施設「いろは呑龍トンネル」を想定した解析を行った。

### 3. 研究の方法

短時間降雨予測モデルとして椎葉らの移流モデルを用いた。移流モデルとは降雨強度分布  $R(x,y)$  を移流ベクトル  $(u_t(x,y), v_t(x,y))$  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、短時間降雨予測に適している。本手法では、降雨分布の変化が移流方程式によって表現されるものとする。本モデルでは、雨域の移流ベクトルおよび単位時間当りの

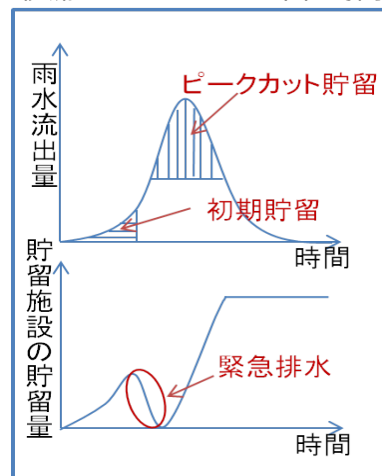


図 1: 実時間制御の概念図

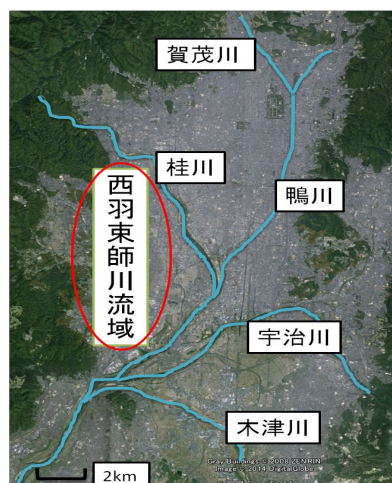


図 2: 対象領域

発達・衰弱量は空間位置の一次式として表現できると仮定し、基礎式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から一次式の係数を推定する。今回使用した移流モデルでは、国土交通省の X バンド MP レーダーの情報をもとに、発達・衰弱項は無視し、20 分前・10 分前・現在の 3 つのレーダー画像データをもとに 10 分間隔で 1 時間先までの予測を行った。

雨水流出過程については Kinematic Wave Model を用いてモデル化を行った。対象流域の水路網や交通用地等を考慮して計 73 個の支流域に分割し、支流域毎に左右の長方形斜面にわけて斜面面積、斜面勾配、等価粗度などを設定した。モデル化された長方形斜面の雨水流には 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同様とみなす。これと連続式を用いて、特性曲線法を適用して雨水流出量の算定を行った。河道流に対しても斜面の場合と同様に解析を行った。

トンネル型貯留施設を対象とするため、詳細な貯留雨水の挙動をモデル化のためには貯留管内の流下過程を考慮する必要があるが、緊急排水操作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を行うため、貯留管をひとつの単純なタンクであると仮定した。貯留管の容量は暫定供用されている乙訓ポンプ場までの北幹線を想定し  $107,000\text{m}^3$  とした。貯留管への流入点は 2 カ所を設定した。1 カ所はピークカット貯留を実施するための流入点であり、暫定供用の流入点である寺戸川第四向陽小学校付近に設置し、河川流量がある一定値 ( $Q_{in}$ ) を超えると越流分が全量呑龍トンネルへ流れ込むものとした。さらに初期貯留流入地点として、支流である石田川が西羽束師川に合流する乙訓地点を設定した。これは、初期貯留雨水の緊急排水のために利用できるポンプ施設が建設されていること、また、石田川支流域には工場等が多く存在し、本川と比較して河川汚染物質濃度が高く雨水貯留による汚濁負荷供給が大きいという特徴に基づく。初期貯留は、降雨初期に石田川の河川水をあらかじめ設定された初期貯留容量 ( $V_f$ ) に達するまで全量呑龍トンネルに流入させる。また、現状の乙訓ポンプ場は降雨終了後にピークカット貯留水を西羽束師川に排水するために設置されており、降雨継続中の緊急排水や連続的に貯留し続ける流動管としての操作を前提として設計されていない。そこで、本来貯留施設流末に設置予定の呑龍ポンプ場能力 ( $10\text{m}^3/\text{s}$ ) を有する施設を乙訓地点に設置するものと仮定した。

緊急排水操作は、降雨予測により得られた予測降雨を入力情報として 1 時間先まで得られる予測河川流量に基づき、ピークカット貯留地点での流量が  $Q_{in}$  を超えると予測された時点で速やかに実施されると設定した。降雨および流量予測は 10 分毎に更新し、1 時間後

予測降雨量を繋げた時系列データを入力降雨とした。また、先行研究に基づき  $Q_{in}$  を  $30\text{m}^3/\text{s}$ 、 $V_f$  を  $18,000\text{m}^3$  と設定した。

予測降雨情報の活用方策として、以下の検討を行った。移流モデルによる降雨予測は現時刻までの降雨域の移動を外挿するため、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もあり。このような予測誤差を考慮し、注目する各グリッドの周囲 1 つ分を合わせた計 9 個のグリッドを”周辺領域 1”、周囲 2 つ分を合わせた計 25 個のグリッドを”周辺領域 2”と呼ぶ。同様に周辺領域 12 までを解析対象とし、対象範囲からの予測降雨情報の選択方法として”中心値選択”(直上のデータを入力降雨として用いる場合)、“平均値選択”(周辺領域のデータを平均した値を用いる場合)、“最大値選択”(周辺領域のデータのうち最大の値を用いる場合)、“最小値選択”(同様に最小の値を用いる場合)の選択方法を採用した。当然、周辺領域を広くとり最大値選択を行うと浸水リスクは最も改善されるが、対象流域に到達しない異なる降雨域を捉えて過大予測となり、実際にはピークカット貯留を必要としない程度の降雨に対しても緊急排水を行う“空振り”の可能性も高くなる。一方、過小予測の場合、緊急排水が未実施あるいは不完全な実施となり、ピークカット貯留開始時点で初期貯留雨水が残存し、施設全容量を浸水防止用に用いることができない。実時間制御を現実に導入するためには、ピークカット貯留が行われる事例において緊急排水が完了し、全施設容量を浸水防止目的に使用できる状態で浸水リスクが増大しないことを制約条件とした上で、ピークカットが行われない事例において緊急排水を行わずに汚濁負荷削減効果を得る最適化問題と位置づけられる。

C バンドレーダーに適用されてきた移流モデルを一部改良し 2011~2013 年の強雨事例を対象として X バンドレーダーによる降雨予測を実施し、先行研究に基づき実時間制御の各パラメータを設定して解析した結果、最大値選択を行った場合のみ浸水リスクが増大せずに緊急排水操作が実施可能となった。ピークカット貯留が行われる全ての事例において緊急排水が完了するためには周辺領域 10 以上すなわち周囲 2.5km の範囲の予測降雨情報まで考慮に入れて最大値選択をする必要があった。観測最大降雨強度を含む 1 時間降雨の予測精度およびピークカット貯留が必要となる強雨事例群 A の 7 つの降雨事例における初期貯留残存量総和との関係をまとめる(図 3)。周辺領域が狭い場合に過小評価であった事例でも、周辺領域を拡大することで対象流域の近傍で予測された強雨域が入力降雨となり、降雨予測相対誤差は負から正の側に変化する。2012/07/21 の降雨は急激に発達・衰弱した事例のため、強雨の予測時間帯が観測降雨の衰弱時にずれており、さらに観測降雨強度がしきい値以下のため相対

誤差評価値に反映されていない。このため図3(上)中の相対誤差が負の値となっている。ただし、ピークカット貯留開始時刻の30分前までに緊急排水が開始されたために、初期貯留残存量はゼロとなっている。一部の降雨事例では過大な降雨予測となっているが、浸水防止目的の上で安全側の予測となり、それに伴い初期貯留残存量総和が減少している。周辺領域11以上となる周囲2.5kmを超えるレーダー降水量情報を活用することで、浸水防止目的を完全に達成することが可能となる。また、実際にはピークカット貯留を必要としなかった事例でも緊急排水が実施されるため、汚濁負荷削減効果はほとんど得られなかった。

#### 4. 研究成果

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、最新型 X バンド偏波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、レーダー予測情報を効率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、対象流域の周辺2.5kmを超える範囲の降雨予測情報を対象とし、その範囲内の予測降雨量の最大値を選択して行った降雨予測および流出予測結果を緊急排水実施の判断基準とすることで、的確な緊急排水が実施され浸水リスクを増加させないことが確認できた。ただし、実際にはピークカット貯留を必要としない降雨事例についても緊急排水が実施され、汚濁負荷削減効果が得られなかった。これは、現状の降雨予測精度のもとでは、対象とした強雨事例群における汚濁負荷削減効果が期待できないことを示しており、降雨予測モデルを改良して降雨予測精度を向上することが今後の課題となる。また、今回の解析対象事例より降雨

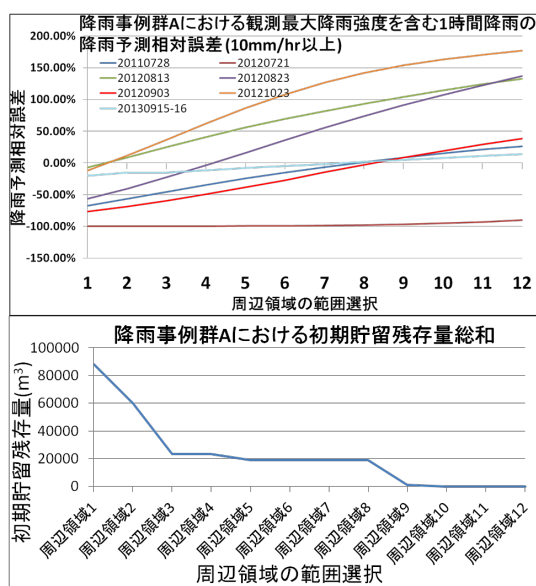


図3: 強雨事例群Aにおける周辺領域選択範囲と降雨予測相対誤差・初期貯留残存量

強度の弱い小降雨事例を含めた長期間の降雨データに基づき、晴天時・雨天時連続の解析を実施することで、浸水防止目的のためのピークカット貯留容量を制約することなく汚濁負荷削減効果が得られることを定量的かつ確率的に評価すべきである。さらに、初期貯留容量や予測リードタイムの変更、より長時間降雨予測情報の活用等、都市雨水管理システムの実時間制御を多面的に検討していく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計5件)

- 1) 城戸由能・佐藤 豪・中北英一: 都市雨水管理システムの実時間制御における X バンド偏波レーダーによる降水予測情報の有効利用方策に関する研究, 土木学会水工学論文集, Vol.59, pp.1\_1345-1\_1350, 2015.
- 2) 城戸由能・佐藤 豪・中北英一: 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, 京都大学防災研究所年報, Vol.57, pp.260-278, 2014.
- 3) Makoto Kimura, Yoshinobu Kido and Eiichi Nakakita: Study on real-time flood forecasting method for locally heavy rainfall with high-resolution X-band polarimetric radar information, IAHS Publ. 351, Weather Radar and Hydrology, pp.454-459, 2012.
- 4) 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, 土木学会河川技術論文集, Vol.18, pp.453-458, 2012.
- 5) 木村 誠・城戸由能・中北英一: 都市内水域における局所集中豪雨に対応したリアルタイム浸水予測手法の簡素化, 土木学会水工学論文集, Vol.56, pp.1-985-1-990, 2012.

〔学会発表〕(計5件)

- 1) 佐藤 豪・城戸由能・中北英一: 雨水貯留施設の実時間制御のための X バンドレーダー降水量予測情報活用の検討, 水文・水資源学会 2014 年研究発表会要旨集, pp.78-79, 2014/09/25.
- 2) 佐藤 豪・城戸由能・中北英一: 雨水貯留施設の実時間制御における X バンドレーダー降水量予測情報の活用に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.69, pp.-082\_1- -082\_2, 2014/09/11.
- 3) Go SATOH, Yoshinobu KIDO and Eiichi NAKAKITA: Application Strategy of RADAR Forecasting Information for Real Time Control of Urban Stormwater Storage System. Abstract of AOGS, 2014/07/31.
- 4) 佐藤 豪・城戸由能・中北英一: X バンドレーダー降水予測情報を活用した雨水貯留施設の実時間制御に関する研究, H26 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集,

pp. -30\_1- -30\_2 , 2014/05/31 .

5)Yoshinobu Kido, Makoto Kimura and Eiichi Nakakita: Stormwater Runoff Analysis and Urban Flood Management in Japan, Proc. of The Scientific Research Meeting between King Abdulaziz University and Kyoto University", pp.38-39 , 2013/03/23.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

城戸 由能 (KIDO, YOSHINOBU)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：50224994

### (2)研究分担者

中北 英一 (NAKAKITA, EIICHI)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：70183506

山口 弘誠 (YAMAGUCHI, KOUSEI)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：90551383

### (3)連携研究者：無し