

## 降雨流出氾濫(RRI)モデルの開発と応用

佐山敬洋・岩見洋一

### 1. はじめに

山地・平野を問わず、降雨流出から洪水氾濫までを流域一体で解析する降雨流出氾濫モデル(Rainfall-Runoff-Inundation: RRI Model)の開発を進めてきた<sup>1)</sup>。本報は、RRIモデル開発の背景と構成・特徴を概説したうえで、インダス川流域とチャオプラヤ川流域を含む適用事例を紹介する。

### 2. モデル開発の背景

2011年タイ洪水のような国外の大規模洪水に際しては、被災国はもとより、我が国の在外公館や進出企業においても、限られた情報をもとに被害の全容を把握し、迅速な対応が求められる。大規模洪水の浸水範囲を特定するうえでは、衛星による洪水モニタリングの実用化が進んでおり、いくつかの国際機関が洪水発生直後から衛星による浸水範囲の分析結果を発信している。しかし、衛星による洪水モニタリングは撮影頻度や空間解像度に限界があり、また被害に直接関係する浸水深の時間変化を予測することはできない。

洪水時の河川流量については、近年進歩してきた衛星情報(降雨量や標高推定技術)を水文モデル(分布型流出モデル)に入力することによって、大まかに予測できる可能性がある。しかし、既存の水文モデルの多くは山地流域からの降雨流出をシミュレーションすることに主眼が置かれており、氾濫の現象を再現していない。一方で、我が国やその他の先進国で開発・適用されてきた氾濫モデルの多くは、破堤地点からの流量を境界条件にして氾濫水の挙動を詳細に追跡するモデルが主流であり、流域全体でどの地域がどのように氾濫するかを降雨情報から大まかに予測するには必ずしも適さない。流域の各地で氾濫が発生する大規模洪水を予測するうえでは、降雨流出と洪水氾濫を一体的に取り扱うことが望ましいと考え、以下に示すような特徴を有するRRIモデルの開発を始めた。

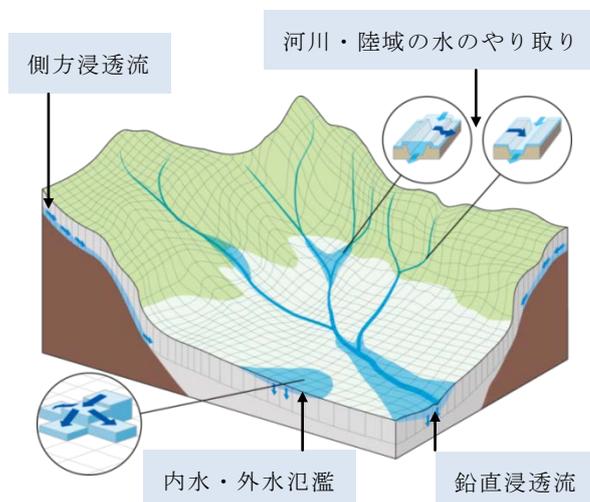


図-1 モデル構造の概要と再現する水文過程

### 3. モデルの構成

RRIモデルは対象とする流域を河道と陸域に分けて取り扱う(図-1)。河道のあるグリッドセルにおいては、一つのグリッドセルに河道と陸域の両方が存在する。河道はグリッドセルの中央を流れる線分として表現し、越流公式に基づいて河道・陸域の水のやり取りを計算する。

以下にモデルの構成を概説する。

- (1) 二次元拡散波近似：一般的な分布型流出モデルは地形の勾配に応じて流れの方向を事前に決定し、一次元のキネマティックウェーブ式を適用することが多い。一方、RRIモデルは、低平地の降雨流出過程や氾濫原における浸水の状況を的確かつ迅速に解析するため、移流項を省略して拡散波近似した二次元の浅水方程式を流域全体に適用している。このため構造物周辺など複雑な氾濫現象の水理解析には適さないので留意が必要である。
- (2) 水文過程の反映：通常の氾濫モデルは破堤地点からの氾濫量を境界条件に取り、氾濫原における氾濫水の挙動を詳細に解析する。一方、RRIモデルは、降雨流出モデルとしての機能も有するため、平野部における鉛直浸透流・山地域における側方浸透流、蒸発散と土壤乾燥による蒸発抑制、さらにはダムや放水路の影響など、従来の氾濫モデルでは考慮されてこなかった水文過程・流水制

御の過程を簡潔に表現している。

(3) 高速・安定的な数値計算アルゴリズム：RRIモデルは時間ステップが自動的に変化する方法(適応時間ステップルンゲクッタ法)で基礎式を解く。またソースコードにOpenMPを用いた並列化アルゴリズムを導入しており、一般的なPCで誰でも簡単に並列計算ができる。これにより後述するタイ洪水の事例では、利根川流域の約10倍に相当する16万km<sup>2</sup>のチャオプラヤ川流域を2kmのグリッドセルで計算し、約2時間で5か月分の流出氾濫計算を実行することができた。

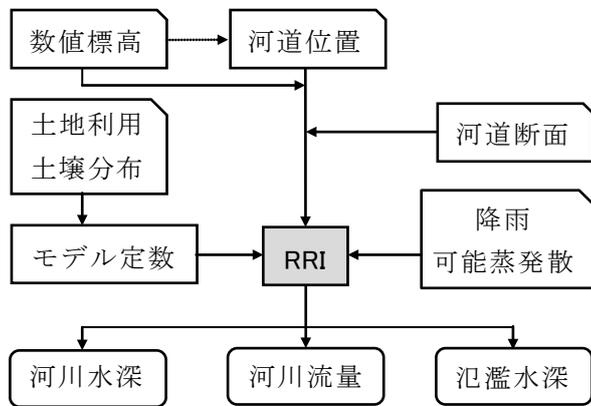


図-2 RRIモデルの入出力情報と適用の手順

#### 4. モデル適用の手順

モデル適用の手順を図-2に従って説明する。

(1) 対象地域の数値標高情報を準備する。詳細な情報が得られない国外地域を対象にする場合、衛星によって推定された地形情報であるHydroSHEDSデータなどの利用が有効である。同データセットには河道位置の推定情報も含まれており、これに幅・深さ・堤防高の情報を付与してモデルの河道断面を定める。なお水深に応じた粗度と潤辺の情報に基づいて任意の河道断面を設定することも可能である。

(2) 降雨・可能蒸発散量の入力情報を準備する。地上雨量の情報が不十分な場合には衛星雨量を補完的に用いる。RRIモデルのパッケージには、衛星雨量をモデルの入力フォーマットに変換するプログラムを同梱している。

(3) 土地利用分布や土壌分布の情報をもとに流域を区分し、区分毎にモデル定数を推定する。モデル出力は河川水深・河川流量・氾濫水深の時空間分布情報であり、対応する観測情報や衛星による

浸水域情報などと比較しながらモデル定数を調整する。

(4) 上述のモデル出力情報はGoogle Earthなどを用いて可視化できる。モデルパッケージは出力結果を加工するプログラムを同梱している。

ちなみにRRIモデルの適用は流域全体に限らない。境界条件を設定することで、下流域や氾濫原だけを対象に計算できる。また計算終了時の状態量を出力して、それを初期状態量として読み込むことにより、逐次計算を進めることができるので、リアルタイムの洪水予測にも応用しやすい設計になっている。

#### 5. モデルの適用事例

##### 5.1 国内流域を中心としたモデルの動作検証

RRIモデルの検証については、既存の分布型流出モデル及び浅水方程式に基づく氾濫モデルと比較し、RRIモデルの流出・氾濫モデルとしての性能を確認した。図-3は2004年新潟県刈谷田川洪水を対象に浅水方程式モデルとRRIモデルによる氾濫解析結果を比較した結果である。刈谷田川全体の浸水分布の比較において、両モデルの結果が概ね対応することを確認した。

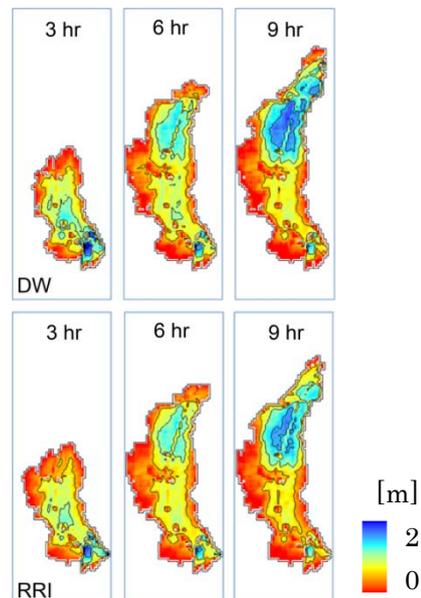


図-3 2004年刈谷田川洪水を対象にした浅水方程式モデル(上)とRRIモデル(下)の計算比較

次に兵庫県佐用川流域(円光寺上流: 189km<sup>2</sup>)を対象に降雨流出と氾濫とを一体的に計算し、2009年洪水時の実績浸水域と比較した(図-4)。モデル検証の詳細については本報では省略するが、

この事例のようにまず国内の流域でモデル検証を実施したうえで、国外の低平流域における事例として、インドネシア・ソロ川流域を対象に観測流量や衛星浸水域と比較しながらモデルを検証した。さらに、広域の氾濫解析という観点から、高潮の潮位を境界条件として2004年のミャンマー・サイクロナルギスによる洪水の再現計算<sup>2)</sup>を行った。

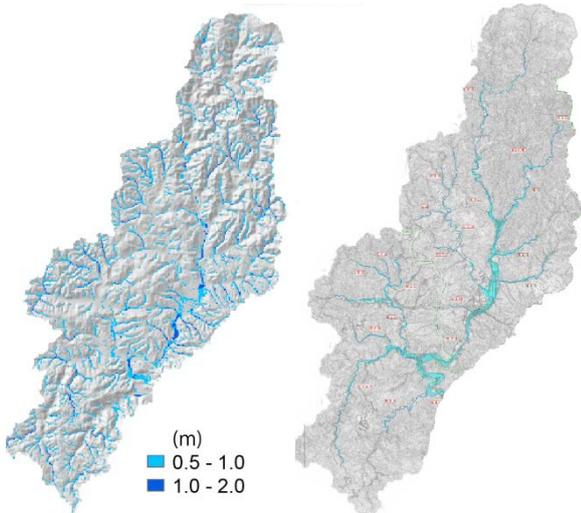


図-4 兵庫県佐用川流域を対象とした解析事例  
(左:RRIモデルによる浸水深, 右:実績浸水域)

## 5.2 パキスタン・インダス川流域への適用

2010年7月末にパキスタン北西部に位置するインダス川支川カブール川流域でフラッシュフラッドが発生し、千名以上の死者を出す大災害となった。また8月に降り続いた雨は本川中下流域にも大規模な洪水被害をもたらした。この洪水を受けて、ICHARMではカブール川流域を対象に、衛星雨量・地上雨量を用いたフラッシュフラッドの解析を実施し、リモートセンシングで捉えきれなかった洪水の被災域を、RRIモデルのシミュレーションで概ね特定できることを明らかにした<sup>1)</sup>。また数値気象モデル(WRFモデル)を用いたアンサンブルの予測降雨量をRRIモデルに入力し、確率的な情報を伴う氾濫予測の解析結果を示した<sup>3)</sup>。さらに、カブール川に適用したRRIモデルをインダス川全流域に展開し、特に本川から約200km離れて広がった大規模氾濫をRRIモデルで再現できることを示した<sup>4)</sup>。

一連の研究成果は、ICHARMが進めているUNESCOの「パキスタン洪水警報及び管理能力強化計画プロジェクト」でも活用され、中下流域

に適用したRRIモデルが、実時間の河川流量・氾濫予測モデルの一つとしてパキスタン気象局に導入されている。また複数の破堤シナリオを考慮したRRIモデルの浸水想定結果(図-5)は、同国政府が開発したGISシステム上でインダス川の広域ハザードマップとして表示・公開され、洪水被害軽減に寄与することが期待されている。

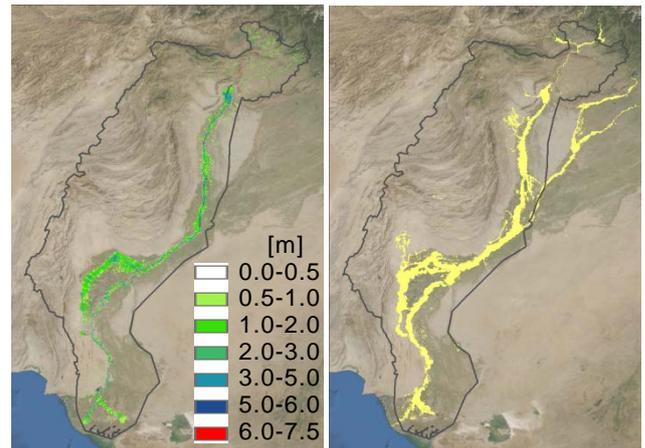


図-5 パキスタン・インダス川中下流域を対象にした解析事例(左: RRIモデルによる浸水深, 右:衛星画像による浸水想定域)

## 5.3 タイ・チャオプラヤ川流域への適用

2011年雨季のタイ・チャオプラヤ川流域で発生した洪水に対して、ICHARMはRRIモデルを用いた緊急対応のシミュレーションを実施した。具体的には、チャオプラヤ川流域を対象に2kmのグリッドセル(後に下流域は1km)でモデルを構築し、衛星雨量や気象モデルによる予測雨量を入力しながら洪水の動向を逐次解析した。10月中旬の計算結果が概ね衛星画像による浸水想定域と対応していること(図-6)、11月末頃まで下流部アユタヤ付近で氾濫が残る可能性があることが分かったので、国交省と共同でその推定結果を発表した。その後、より詳細な情報を入力して計算をし直しながら(図-7)緊急対応で概ね推定できたこと、できなかったことを整理した<sup>5)</sup>。さらにRRIモデルを用いた長期連続のシミュレーションも可能にし<sup>6)</sup>、氾濫頻度マップの作成や気候変動による氾濫量の変化推定に関する研究を進めている。

上記の緊急対応の解析を契機として、JICAが実施した「チャオプラヤ川流域洪水対策プロジェクト」は、治水対策効果分析のためのモデルの一つとして、またリアルタイム氾濫予測システムの基礎として、RRIモデルの実務利用が進んでいる。

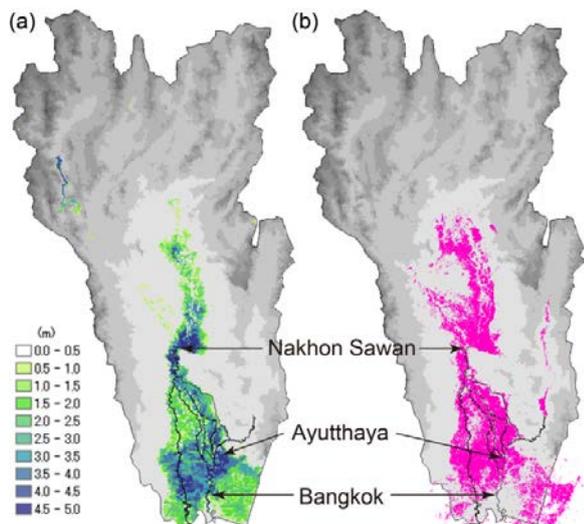


図-6 タイ・チャオプラヤ川流域を対象にした緊急対応のシミュレーション結果(左: RRI モデルによる浸水深, 右: 衛星画像による浸水想定域)

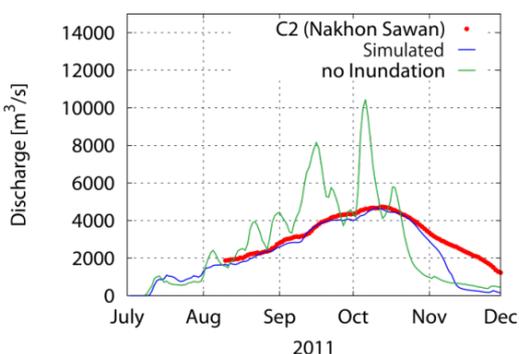


図-7 チャオプラヤ中流(ナコンサワン地点)の計算流量結果: 氾濫を考慮しないケース(緑)は、考慮するケース(青)に比べ観測(赤)を過大評価している。

## 6. おわりに

本報はRRIモデルの開発と国外の大規模洪水を対象にした適用事例を紹介した。RRIモデルは、降雨情報を入力して流域全体で降雨流出と洪水氾濫とを一体的に解析できる点にその特徴がある。この特性を活かして、今後我が国の中小河川流域においても、流域スケールの洪水ハザードマップ作成や、大まかな氾濫情報を含む洪水予測などに応用が進むことを期待する。一方、本モデルは構造物周辺など複雑な氾濫現象の水理解析を目的にしたモデルではないので、その応用にあたっては留意が必要である。RRIモデルのソースコード・マニュアル・関連プログラムは2014年2月より、要請に応じて公開<sup>7)</sup>している(実務利用の際

には利用許可申請が必要)、今後様々な目的で利用が進み、またモデルが改良されることによって、国内外の水災害リスク軽減に寄与することを期待している。

### 参考文献

- 1) Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S., Fukami, K.: Rainfall-Runoff-Inundation Analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, Hydrological Sciences Journal, 57(2), pp.298~312, 2012
- 2) 佐山敬洋、Nay Myo Lin、深見和彦、田中茂信、竹内邦良: 降雨流出氾濫モデルによるサイクロナルギス高潮氾濫シミュレーション、水工学論文集、第55巻、S529~534、2011
- 3) Tomoki Ushiyama, Takahiro Sayama, Yuya Tatebe, Susumu Fujioka, Kazuhiko Fukami: Numerical Simulation of 2010 Pakistan Flood in the Kabul River Basin by Using Lagged Ensemble Rainfall Forecasting. Journal of Hydrometeorology, 15, 193-211, 2014
- 4) 佐山敬洋、藤岡 奨、牛山朋来、建部祐哉、深見和彦: インダス川全流域を対象とした2010年パキスタン洪水の降雨流出氾濫解析、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.68、No.4、I\_493~I\_498、2012
- 5) 佐山敬洋、建部祐哉、藤岡 奨、牛山朋来、萬矢敦啓、田中茂信: 2011年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.69、No.1、pp.14~29、2013
- 6) 建部祐哉、佐山敬洋、牛山朋来、藤岡 奨、田中茂信: チャオプラヤ川流域における長期降雨流出氾濫解析、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.69、No.4、I\_457~I\_462、2013
- 7) Sayama, T.: Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Technical Manual, Technical Note of PWRI, No. 4277, Public Works Research Institute, 2014

佐山敬洋



(独)土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ 主任研究員  
Takahiro SAYAMA

岩見洋一



(独)土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ 上席研究員  
Yoichi IWAMI