

1.8 発展途上国における統合洪水解析システムの開発・普及に関する研究（2）

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 22

担当チーム：水災害研究グループ（水文）

研究担当者：深見和彦、佐山敬洋

【要旨】

降雨流出から洪水氾濫までを一体として解析する降雨流出氾濫モデル(RRI モデル)を開発し、インドネシアのソロ川流域に適用した。モデルによって推定された浸水域は衛星リモートセンシングで特定された浸水域を妥当に再現した。また、浸水の影響を考慮することによって、下流部の水位・流量の再現性が向上することを確認した。さらに、ソロ川下流部の本川沿いに 4m の堤防があった場合の数値実験を実行し、本川沿いの堤防は、周辺の浸水深を約 50 cm 低減させる程度の限定的な効果しか持たないことを明らかにした。開発した RRI モデルは、洪水が氾濫することを想定に入れた統合洪水リスクマネジメントに今後有効に応用できるものと考えられる。

キーワード：降雨流出、洪水氾濫、ソロ川、洪水予測、統合洪水リスクマネジメント

1. はじめに

大規模な氾濫を伴う洪水が世界の各地で発生している。2010 年以降でも、パキスタン・インダス川、オーストラリア南東部、ベトナム中部、米国ミシシッピ川など、大規模な洪水が各地で甚大な被害をもたらしている。こうした大規模洪水災害の際には、政府は限られた情報をもとに被害の全容を把握し、住民避難の指示や水工施設の管理を行う。大洪水の被災域を特定するうえで、衛星リモートセンシングによる洪水モニタリングが非常に有効であり、国連衛星利用プログラム(UNOSAT)などの国際機関は、洪水の発生直後から人工衛星による浸水想定域の情報を配信している。ただし、衛星による洪水モニタリングにも撮影頻度や空間解像度などの問題があり、浸水域の拡大傾向を時系列で把握したり、被害に直接関係する浸水深を推定したりすることは現段階では難しい。そこで、衛星による洪水モニタリングを補完する手段として、当グループでは水文モデルの応用に着目し、全球任意の地域で迅速に水文モデルを展開して、河川流量から洪水氾濫域までを一体的に予測するシステムの開発を進めている^{1),2),3)}。

河川流量から洪水氾濫までを一体的に解析することができれば、洪水氾濫の可能性を前提とした統合洪水リスク管理(Integrated Flood Risk Management: IFRM)⁴⁾の評価分析にも応用できる。IFRM では、災害発生後の緊急対応に加えて、事前の災害リスク管理にも重点をお

く。とくに、氾濫することを想定に入れたうえで、土地利用の規制やハザードマップの策定を進めることが今後ますます重要となる。さらに、各種の対策が、将来予想される気候変動の適応策としてどの程度有効かを評価するためにも、河川流量に加えて洪水被害に直接関係する洪水氾濫に着目することが大切である。

降雨流出と洪水氾濫とを一体的に解析することによって、分布型降雨流出モデルでは再現の難しかった低平流域での河川流量予測の精度向上も期待できる。これまでの分布型降雨流出モデルでは、地形の情報をもとに流れの方向をあらかじめ決定し、降雨から流出を予測してきた。低平地を含む流域においては、流れの方向を地形によって定めることが難しく、また、洪水氾濫の影響が河川流量にも大きく影響しているため、従来の分布型降雨流出モデルの適用性に問題があった。流れの方向と流量が各地点の水位勾配によって変化するモデリングを流域全体に展開することが出来れば、浸水の影響を考慮に入れた河川流量の推定も可能となる。

本報で報告する降雨流出氾濫モデル(Rainfall-Runoff-Inundation Model: RRI Model)モデルは、拡散波近似した 2 次元の浅水方程式を基調とする。ただし、山地から平野までを一体として解析することを目的としているため、降雨流出モデルとしての役割にも重点をおく。従って、従来の同様の氾濫モデル⁵⁾では対象としなかった山地での地中部の流れや、平野での浸透の影響も

考慮することが大切となる。また、大規模洪水発生時の被害状況を迅速に把握することがモデルの目的の一つであるため、モデル適用から実行までの手順が簡単であること、パラメータの数を最小限にとどめることにも留意して開発を進めた。本報では、開発したモデルをインドネシア・ソロ川流域に適用し、降雨流出氾濫現象の再現性を検証した結果を報告する。

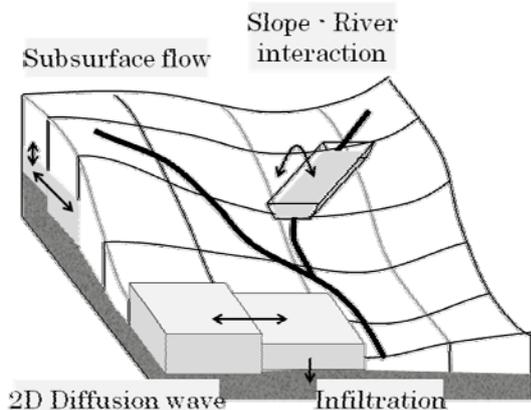


図1 降雨流出氾濫モデルの構成

2. 降雨流出氾濫モデル(RRI モデル)の構成

2.1 モデルの概要

RRI モデルは、降雨を入力として河川流出から洪水氾濫までを一体的に解析することを目的としたモデルである。図1に示すように、同モデルは対象とする流域を斜面部と河道部とに分けて取り扱う。斜面部は50 m から1 km 程度のグリッドセルに分割する。河道グリッドセルにおいては、一つのグリッドセルに河道と斜面の両方が存在することを仮定する。河道はグリッドセルの中央を流れるベクトルとして表現し、上流・下流における河道の接続情報を持つ。降雨は斜面部にのみ入力し、斜面部・河道部でそれぞれ水の挙動を追跡した後に、適当な時間刻みで斜面部と河道部との水のやり取りを計算する。

RRI モデルの3つの特徴を以下に示す。

- 1) 二次元の拡散波近似解析 : 氾濫原の浸水拡大過程や低平地における降雨流出過程を適切に計算するため平面二次元の解析を行う。浅水方程式を拡散波近似することにより、各グリッドセルにおける流出方向とその流速を周囲グリッドセルの水位によって算定する。
- 2) 側方地中流、鉛直浸透流の反映 : 流域からの流出量を計算するうえで、地中の水の流れを再現することが大切である。地中の水の流れは、斜面流下方向の側方地中流が卓越する場合と、鉛直方向の浸透流が卓越する場合がある。RRI モデルでは、側方地中流については、我が

国の山地流域で多くの適用実績がある中間流・表面流を反映する流量流積関係式⁶⁾を基礎式とする。また、鉛直浸透流については、土質に応じたパラメータ範囲が推定されている Green-Ampt 式を用いる。

3) 河道と斜面のインタラクション : 流出と氾濫とを一体的に解析するためには、河道と斜面との水のやり取りを適切に再現する必要がある。RRI モデルの河道グリッドセルでは、上下流の水位差によって、拡散波近似に基づき流量と水位を計算する。さらに、河道と斜面の水位差および堤防高に基づいて、両者間の水の流出入を計算する。河道は長方形断面を仮定して、河道幅・深さ・堤防高をパラメータとして形状を規定する。

2.2 二次元斜面部モデル

RRIモデルの斜面部には、浅水方程式を拡散波近似した式を適用する。基礎となる二次元浅水方程式は以下のように表わせる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \frac{\partial v q_x}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w} \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \frac{\partial v q_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho_w} \quad (3)$$

ここに、 h : 水深、 u, v : x, y 方向の流速、 q_x, q_y : x, y 方向の流量フラックス($q_x = uh, q_y = vh$)、 H : 基準面から自由水面までの高さ、 τ_x, τ_y : x, y 方向のせん断応力、 ρ_w : 水の密度である。右辺第二項は、Manning則を用いて次のように算定する。

$$\frac{\tau_x}{\rho_w} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho_w} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

ここに、 n : 粗度係数である。RRIモデルが仮定する拡散波近似は、(2)、(3)式の慣性項(左辺の項)を十分に小さいものとして無視する。さらに、 x 方向と y 方向とを分けることによって、つまり(2)、(3)式中の v と u をそれぞれ無視することによって以下のように書き換える。

$$q_x = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial H}{\partial x} \right] \quad (6)$$

$$q_y = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial H}{\partial y} \right] \quad (7)$$

RRIモデルはデカルト座標系に基づくグリッドセルモデルであり、(1)式の連続式を

$$\frac{\partial h^{i,j}}{\partial t} + \frac{q_x^{i,j-1} - q_x^{i,j}}{\Delta x} + \frac{q_y^{i-1,j} - q_y^{i,j}}{\Delta y} = r^{i,j} \quad (8)$$

として用いる。ここに $q_x^{i,j}$ 、 $q_y^{i,j}$ はグリッドセル (i,j) からそれぞれ x 方向、 y 方向に流出するフラックスである。同様に(6)、(7)式にも差分を適用すると流量フラックスを求めることができ、それに伴って各グリッドセルの水深を求められる。

2.3 中間流・表面流モデルによる側方地中流の再現

上述の(6)、(7)式は地表面流について流量と動水勾配との関係を表した式である。RRIモデルは降雨流出と洪水氾濫との両方を一体的に解析することを念頭に置いているので、地表面流とあわせて支配的な地中流を簡単に再現することも大切である。高棹・椎葉⁷⁾は、中間流・表面流を一体的に追跡するため(9)、(10)式のような流量流積関係式を提案しており、本研究でも同様の式を採用する。

$$q_x = \begin{cases} -kh \frac{\partial H}{\partial x}, & (h \leq d) \\ -\frac{1}{n} (h-d)^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) - k(h-d) \frac{\partial H}{\partial x}, & (d < h) \end{cases} \quad (9)$$

$$q_y = \begin{cases} -kh \frac{\partial H}{\partial y}, & (h \leq d) \\ -\frac{1}{n} (h-d)^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) - k(h-d) \frac{\partial H}{\partial y}, & (d < h) \end{cases} \quad (10)$$

ここに、 k は側方の透水係数、 d は土層厚×有効空隙率である。なお、高棹・椎葉⁷⁾が提案した流量流積関係式は、キネマティックウェーブを仮定しており、もとの式は上記中の水位勾配項が斜面勾配に置き換わっていることに注意する。

2.4 斜面部の鉛直浸透モデル

透水係数の小さな土壌が斜面を覆っている場合や、斜面勾配が小さい場合には、初期の降雨は鉛直方向に浸透し、

洪水の流出にはそれほど寄与しないと考えられる。RRIモデルでは、鉛直方向の浸透量をGreen-Amptモデル⁸⁾で計算し、地下への損失として取り扱う。上述の中間流・表面流とGreen Amptモデルを組み合わせる場合には、土層の下部から基盤岩に浸透する量をGreen-Amptモデルで算定し、残りの水を中間流・表面流として側方に流すことになる。Green Amptモデルの式は、

$$f = k_v \left[1 + \frac{(\phi - \theta_i) S_f}{F} \right] \quad (11)$$

のように表わされ、 k_v は鉛直の飽和透水係数、 ϕ は土壌の空隙率、 θ_i は初期の土壌水分量、 S_f は浸潤前線における吸引圧、 F は浸透量の累積値である。

3. インドネシア・ソロ川流域への適用

3.1 流域の概要

広域な低平地を含む例として、インドネシア・ソロ川流域を対象にRRIモデルを適用する。ソロ川はインドネシアのジャワ島に位置し、ラウ火山を起源としてジャワ海に流出する。流域面積は16,100 km²である。流域の下流部には広大な低平地が広がり、2007年の12月には大規模な洪水が生じて上流域から下流域を含めて多くの地域で浸水被害が発生した。

3.2 計算条件

本研究では、2007年12月24日から2008年1月8日を対象として、RRIモデルによる降雨流出氾濫解析を実行する。入力降雨は、流域125地点で観測された日雨量をティーセン分割したものとする(図2、図3)。この地域では詳細な地形データを得ることができないので、HydroSHEDS⁹⁾のデータセットに含まれる15秒(約460 m×460 m)の地形情報を用いる。HydroSHEDSには最急勾配の流下方向と集水面積のデータが含まれる。これらの情報を用いて、河道幅(Width [m])と深さ(Depth [m])は以下のように各グリッドセルの集水面積(Area [km²])の関数として設定した。

$$Width = C_w Area^{D_w} \quad (12)$$

$$Depth = C_d Area^{D_d} \quad (13)$$

ここに、 C_w 、 D_w 、 C_d 、 D_d は河道幅・深さを決定するパラメータであり、現地の河道断面情報をもとに、次のように決定した: $C_w=5.0$ 、 $D_w=0.35$ 、 $C_d=0.95$ 、 $D_d=0.2$ 。

ソロ川流域は、火山性の土壌で覆われているため、この地域の降雨流出を再現するうえでは、鉛直方向の浸透

1.8 発展途上国における統合洪水解析システムの開発・普及に関する研究(2)

による初期損失を考慮することが大切であると考えられる。この適用例では、流域の土地利用を三種類(森林域・農地域・その他)に分けて、森林域については Green-Ampt モデルによる鉛直浸透流を考慮した。土壌は Clay Loam を想定し、文献⁸⁾を参考にパラメータを次のように設定した： $k_v = 5.55 \times 10^{-7}$ m/s、 $(\phi - \theta) = 0.271$ 、 $S_f = 0.2088$ m。また、この適用例では側方地中流の影響は小さいものと仮定し、地表面流のみを考慮する(9)式、(10)式において、土層厚をゼロに設定した。また、粗度係数 n [m^{-1/3}/s] については、水田で 2.0、森林で 0.6、その他で 0.4、河川で 0.04 に設定した。

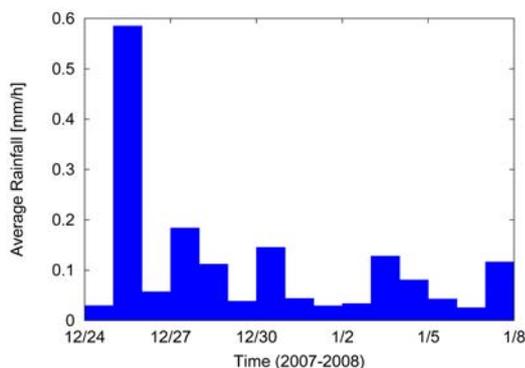


図2 計算対象期間中の流域平均雨量

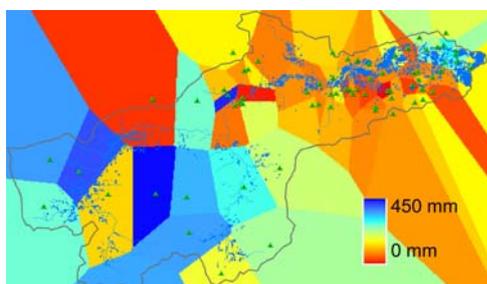


図3 計算対象期間中の総雨量分布

3.3 計算結果と考察

RRI モデルによる最大浸水深の計算結果を図4に示す。また、比較のため衛星リモートセンシング(ALOS/PALSAR)によって推定された12月30日時点の浸水想定域を図5に示す。以下では、ソロ川上流域、マディウン川流域、ソロ川下流域の3つの流域に分けて計算結果を考察する。

ソロ川上流域においては、Jurug 地点の下流で浸水が集中していること、また Julug 地点の上流(Surakarta 付近)で浸水域がまばらに分布していることが衛星画像から確認され、その浸水域をモデルは妥当に再現している。Surakarta 付近の浸水は、モデルの計算結果によると 20 cm から 50 cm 程度の浸水場所が多く、またソロ

川本川から離れた場所にも浸水域が広がっていることから、支川や内水による氾濫の影響も大きいと考えられる。

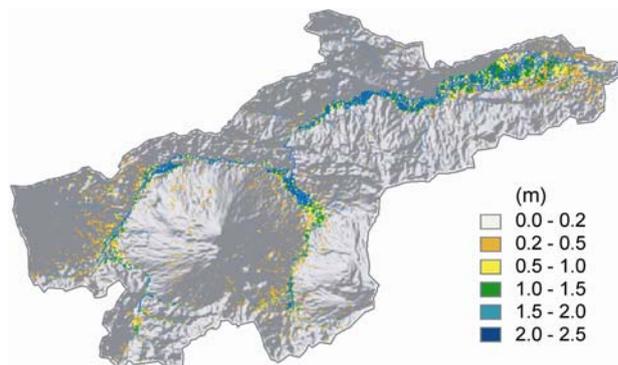


図4 RRI モデルによる計算期間中の最大浸水深

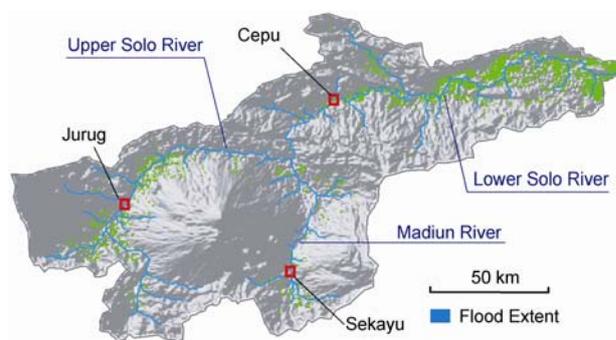


図5 ALOS/PALSAR による浸水想定域

Jurug 地点の水位・流量ハイドログラフ(図6)を見ると、赤色で示した浸水を考慮した場合の結果は、観測水位・流量に比べて時間変化が小さくなり過ぎていることが分かる。一方、緑色で示した浸水を考慮しない場合は、時間変化が大きくなり過ぎる傾向にある。赤色で示した計算結果では、氾濫の影響を過大に評価している可能性がある。また、図3に示すように、Jarung 上流部を含むソロ川上流域では、下流域に比べて雨量データの観測密度が低く、入力降雨が実際よりも小さい可能性がある。

次にマディウン川流域に着目する。図3の結果ではマディウン川がソロ川に合流する手前で浸水深が大きくなっている。一方、衛星による推定結果は、この地域で広域の浸水が発生していなかったことを示唆している。この原因としては、衛星の撮影日時が12月30日であり、既に浸水が低減していたことが考えられる。これは、マディウン川上流域に位置する Sekayu 地点のハイドログラフ(図6)からも推察される。この地域では計算・観測ともに12月27日で水位・流量のピークを迎え、その後は低減している。なお、赤色で示した浸水を考慮した

Sekayu 地点の計算水位は、観測水位を非常によく再現している。一方、観測流量はピーク時で計算結果の4倍程度大きくなっている。この原因は明らかではないが、水位が概ね再現できていること、洪水イベント後半の流量をよく再現できていることから、流量を推定する H-Q 式に含まれる誤差の影響の可能性も否定できない。

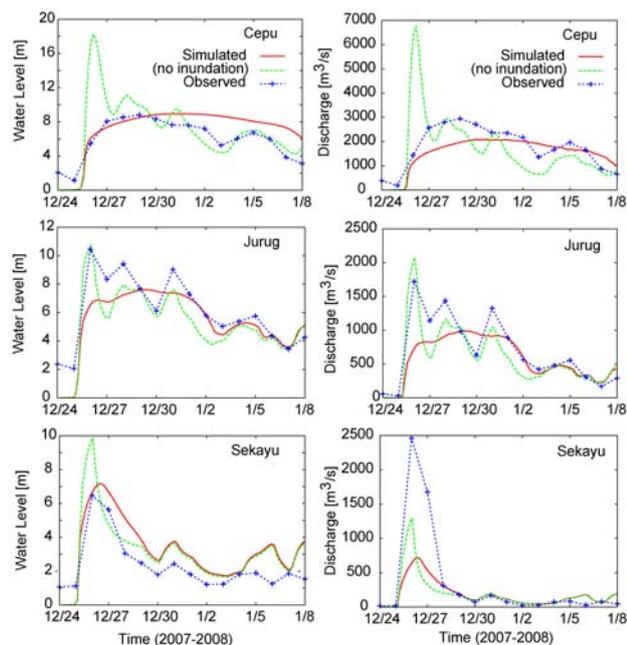


図6 水位・流量ハイドログラフ (赤：浸水を考慮した計算結果、緑：浸水を考慮しない計算結果、青：観測)

最後にソロ川下流域に着目する。この地域では、モデル・衛星画像ともに本川付近で広域に浸水している状況を示しており、モデルは浸水の範囲をよく捉えている。流域の最下流部ではモデルの浸水エリアが衛星画像と比較して狭くなっているが、これは潮位の影響による可能性がある。ソロ川下流域に位置する Cepu 地点の水位・流量ハイドログラフ (図6) は、水位・流量ともに観測量をよく再現している。また、浸水を考慮しない場合の緑の計算結果では、12月26日前後の水位・流量を過大に評価しており、上流の浸水の影響を考慮することが、この地点の河川水位・流量を予測するうえでも重要であることが分かる。

ソロ川下流域の浸水を防ぐうえで、本川沿いの築堤がどの程度効果を発揮するのかを簡単なシミュレーションによって分析する。図7は、ソロ川下流の本川沿いに4mの堤防があることを想定して上記と同じ計算を行った結果を示している。図7(上)は最大浸水深、図7(下)は堤防がある場合とない場合の最大浸水深の差を示す。この

計算結果によれば、本川沿いに4mの堤防を築いても、その周囲の最大浸水深を50cm程度しか低減できないことが分かる。また、堤防の建設によって最下流部では河川の水位が上がり、その周囲の浸水深をより大きくする可能性があることを示唆している。4mの堤防があるにもかかわらず本川沿いの浸水を防げない理由は、支川からの氾濫やその地域に降った雨の内水氾濫によるところが大きいと考えられる。

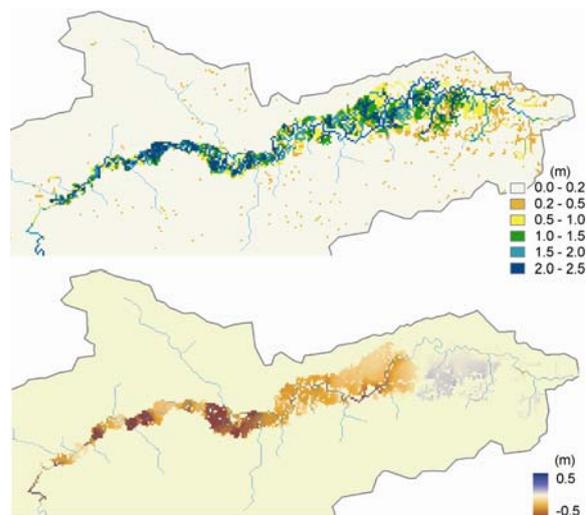


図7 ソロ川本川 (Cepu 地点下流) に4mの堤防があることを想定した場合の最大浸水深(上図)、および堤防の有無による最大浸水深の差(下図)。

4. おわりに

降雨流出から洪水氾濫までを一体として解析する降雨流出氾濫モデル (RRI モデル) を開発した。このモデルは、従来の分布型降雨流出モデルのように流れの方向を事前に決定することなく、時々刻々変化する水面の勾配をもとに流水の方向と流速を決定する。また、山地域の降雨流出を妥当に表現するため、地中部の水の流れをモデル化する。RRI モデルの構造は浸水域が広がる低平流域にとくに適しており、本報ではその一例としてインドネシア・ソロ川流域を対象にした結果を紹介した。

2007年12月から1月にかけての洪水をソロ川全域でシミュレーションした結果、衛星リモートセンシングで特定された洪水氾濫域をモデルは妥当に表現できることが確認された。また、流域の下流部においては、氾濫の影響を考慮することで水位・流量の再現性が向上することを明らかにした。また、ソロ川下流部の本川沿いに4mの堤防があった場合の仮想シミュレーションを実行した結果、本川沿いの堤防の効果は、周辺の浸水深を約50cm

1.8 発展途上国における統合洪水解析システムの 開発・普及に関する研究（2）

低減させる程度にとどまっていた、仮に堤防があった場合でも現状と同様に浸水が広がることが分かった。これは、この地域の浸水が本川からの外水氾濫だけでなく、支川からの流出やその地域に降った雨によってももたらされているためであると考えられた。洪水が頻発する低平地の氾濫水制御は難しく、本報で示したようなシミュレーションを実行することにより、流域一体として有効な対策を講じることが大切である。

参考文献

- 1) 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ン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。
- 2) Sayama, T., Fukami, K., Tanaka, S., and Takeuchi, K.: Rainfall-Runoff-Inundation Analysis for Flood Risk Assessment at the Regional Scale, Proceedings of the 5th Conference of Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources (APHW), Hanoi Vietnam, 8-9 Nov, pp. 568 - 576, 2010.
- 3) Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami, K.: Rainfall-Runoff-Inundation Analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, Hydrological Sciences Journal, 2011, Submitted.
- 4) World Meteorological Organization (WMO), Integrated Flood Management Concept Paper, 27pp, 2009.
- 5) Hunter, N. M., Bates, P. D., Horritt, M. S., Wilson, D., Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review, Geomorphology, 90, pp. 208 - 225, 2007.
- 7) 高棹琢馬・椎葉充晴：Kinematic Wave 法への集水効果の導入、京都大学防災研究所年報、6、pp.166-180、1980。
- 8) Raws, W.J., Ahuja, L.R., Brakensiek, D.L. and Shirmohammadi, A.: Infiltration and soil water movement. Handbook of Hydrology, McGraw-Hill Inc., New York: 5.1-5.51., 1992.
- 9) Lehner, B., Verdin, K., Jarvis, A., New global hydrography derived from spaceborne elevation data. Eos, Transactions, AGU 89(10), pp. 93-94, 2008.

1.8 STUDY ON THE DEVELOPMENT OF THE INTEGRATED FLOOD ANALYSIS SYSTEM IN DEVELOPING COUNTRIES

Budgeted : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2009-2010

Research Team : Water-Related Disaster Research Group

Author : TANAKA Shigenobu, FUKAMI Kazuhiko,
SAYAMA Takahiro

Abstract : Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) model was developed and applied to the Solo River Basin in Indonesia. The simulated flood inundation extent agreed well with the area detected by a remote sensing. The incorporation of the inundation effect could improve greatly the simulation results of flood water level and discharge at the downstream. Furthermore, the numerical experiment with and without 4m height dykes along the lower Solo main river indicated that they have only limited effects of reducing inundation depths with about 50 cm. The developed RRI model can be effectively used for Integrated Flood Risk Management (IFRM), in which the possibility of flooding should be taken into consideration.

Key words : rainfall-runoff, flood inundation, Solo River Basin, flood forecasting, river basin management