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

RAINFALL-RUNOFF-INUNDATION ANALYSIS OF PAKISTAN FLOOD 2010 FOR THE ENTIRE INDUS RIVER BASIN

佐山 敬洋¹・藤岡 奨²・牛山 朋来³・建部 祐哉²・深見 和彦²
Takahiro SAYAMA, Susumu FUJIOKA, Tomoki USHIYAMA, Yuuya TATEBE
and Kazuhiko FUKAMI

¹ 正会員 博 (工) 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター
(〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

² 正会員 工修 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (同上)

³ 正会員 博 (理) 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (同上)

Pakistan suffered from a devastating flood disaster in 2010. This study investigated the potential of utilizing a rainfall-runoff-inundation (RRI) model for providing useful information for effective emergency response. The model was applied to the entire Indus River Basin (modeled area: 929,723 km²) with 60 sec. (about 1.7 km) grid-cells, and its performance was evaluated based on the simulation results of river discharge and flood inundation. More specifically, a large-scale flood extending about 100 km apart from the main Indus River was focused for testing the model performance. Furthermore, by comparing different modelling settings including one- and two-dimensional kinematic and diffusive wave approximations and different treatments of embankment, the study discussed a suitable model structure to achieve the above objective with limited information. As a result, two-dimensional diffusive wave rainfall-runoff-inundation simulation without explicit considerations of embankment turned out to be the best combination for large-scale flood simulation for the case of the 2010 Pakistan flood.

Key Words: *Indus River, Pakistan, flood, RRI Model, inundation, emergency response*

1. はじめに

2010 年 7 月末から 9 月末にかけ、インダス川流域で大規模な洪水が発生した。2 カ月にもおよぶ洪水期間中には、その被災地域や形態がめまぐるしく変化した。7 月末にはパキスタン北西部のカブール川流域で 1,100 名以上もの死者をもたらすフラッシュフラッドが発生した。また、下流部のシンド州においては、サッカル堰上流で堤防が決壊し、本川から約 100 km も離れた地域にまで氾濫水が広がり、多くの建物・農業・疫病被害をもたらした。

こうした大規模洪水災害の際には、政府は、刻一刻と変化する洪水の動向を俯瞰的に把握し、住民避難の指示や水工施設の管理を的確に行うことが大切である。浸水域を特定する手段として、近年、衛星リモートセンシングの応用が進んでおり、UNOSAT などの国際機関は、災害直後からリモートセンシングの解析結果を配信している。ただし、衛星リモートセンシングにも撮影頻度や空間解像度等の問題もあり、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難しい。そこで、衛星リモートセンシングを補完する手段として、筆者らは水文モ

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までを一体的に解析する手法の研究を進めている^{1,2)}。

降雨流出と洪水氾濫とを一体的に解析できれば、従来の分布型降雨流出モデルでは解析の難しかった低平流域での河川流量の精度向上も期待できる。これまでの分布型流出モデルでは、地形の情報をもとに流れの方向をあらかじめ決定し、降雨から流出を計算してきた。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、また洪水氾濫による河川流量の変化を考慮できないため、従来の分布型流出モデルの適用性に問題があった。流出と氾濫とを一体的に解析することで、氾濫の影響を考慮に入れた河川流量の計算が可能となる。

広域を対象にした洪水氾濫解析は、これまでもいくつかの研究事例がある。例えば、Kazama *et al.*³⁾ や Dutta *et al.*⁴⁾ はカンボジア周辺のメコン川流域を対象に、それぞれ 15,400 km²、121,100 km² の領域を 1 km のグリッドサイズで 2 次元氾濫計算を行っている。また、Yamazaki *et al.*⁵⁾ は、約 25 km グリッドサイズの全球スケール水文モデルで 1 次元の流出計算を行いなが

ら、そのグリッドセル内部の貯留効果を反映させることによって、大河川沿いの洪水氾濫を再現することを実現している。さらに、Bates *et al.*⁶⁾ は 2 次元拡散波近似モデルとして LISFLOOD モデルを開発し、多くの適用事例を報告している⁷⁾。筆者らが開発を進める降雨流出氾濫モデル (Rainfall-Runoff-Inundation Model: RRI Model)¹⁾ は、LISFLOOD モデルと同様、拡散波近似を適用した浅水方程式を有限体積法で離散化する。ただし、山地域の降雨流出現象を妥当に表現するため、地表流だけでなく地中流も同じ枠組みで表現する。さらに、山地域から平野部までの解析を安定かつ効率的に解析するため、数値解析法としては適応時間ステップのルンゲクッタ法⁸⁾を採用している。

本論は、RRI モデルをインダス川全流域に適用し、2010 年パキスタン洪水時の河川流量と洪水氾濫の再現性を検証する。具体的には、カブール川に適用したモデル構造とパラメータ¹⁾をインダス川全流域に展開した際に、本川沿いの河川流量や下流部の広域洪水氾濫をどの程度の精度で再現できるのかを検証する。また、堤防の取り扱いなど計算条件の異なる 5 種類のモデリングを比較し、災害対応時の情報提供を目的としたモデルとして、どのような構成が適するのかを論ずる。

2. 降雨流出氾濫モデル

RRI 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。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斜面の両方が存在する。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・下流の接続情報を持つ。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。

(1) 斜面部の 2 次元地中流・表面流モデル

a) 浅水方程式

RRI モデルの斜面部には、2 次元の浅水方程式を拡散波近似した式を用いる。基礎となる 2 次元の浅水方程式は以下のようなものである。なお、 x と y 方向の運動量方程式は類似するので、以下では x 方向のみを記載する。

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

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

ここに、 h は水深、 u 、 v は x 、 y 方向の流速、 q_x 、 q_y は x 、 y 方向の流量フラックス ($q_x = uh$ 、 $q_y = vh$) である。また、 r は降雨強度、 g は重力加速度、 t は時間、 H は基準面からの水位である。右辺第二項は、Manning 則

を用いて次のように計算する。

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

ここに、 n は粗度係数である。

b) 拡散波近似と空間的離散化

RRI モデルが仮定する拡散波近似は、(2) 式左辺の慣性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、(3) 中の v の成分を無視することによって、以下のように書き換える。

$$q_x = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial H}{\partial x} \right] \quad (4)$$

ここに sgn は符号関数である。例えば、水位が x 方向に減る場合には、 $\operatorname{sgn}[\partial H / \partial x]$ が -1 となるので、 q_x は正の値となる。すなわち、 x 軸と同じ方向に水が流れることを意味する。

(1) 式の連続式は、

$$\frac{dh^{i,j}}{dt} + \frac{q_x^{i,j-1} - q_x^{i,j}}{\Delta x} + \frac{q_y^{i-1,j} - q_y^{i,j}}{\Delta y} = r^{i,j} \quad (5)$$

のように空間的に離散化する。ここに、 $q_x^{i,j}$ 、 $q_y^{i,j}$ は (i, j) のグリッドセルからそれぞれ x 方向、 y 方向に流出する単位幅当たりの流量である。(4) 式にも同様に空間差分を適用することで各グリッドセルの水位からグリッドセル間の単位幅流量 q_x を計算できる。離散化した (4) 式を代入すると (5) 式は変数 h の微分方程式となり、以下に示す解法で h と q の時間変化を追跡する。

c) 側方地中流

(4) 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とがある。RRI モデルでは、側方地中流については、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⁹⁾を用いる。

$$q_x = \begin{cases} -kh \frac{\partial H}{\partial x}, & (h \leq d) \\ -\frac{1}{n} (h-d)^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial H}{\partial x} \right] & \\ -k(h-d) \frac{\partial H}{\partial x} & (d < h) \end{cases} \quad (6)$$

ここに k は側方の飽和透水係数、 d は土層厚 $\times$ 有効空隙率である。なお、もとの流量流積関係式は、キネマティックウェーブを仮定しており、上式中の $\partial H / \partial x$ 、 $\partial H / \partial y$ が斜面勾配になっていることに注意する。

(2) 河道部の 1 次元拡散波近似モデル

河道部には 1 次元の拡散波近似モデルを適用する。河道断面の主河道は長方形を仮定する。ただし、詳細な

河道断面情報を得ることが出来ない場合には，第一次近似として河道幅 $W[m]$ と深さ $D[m]$ を以下の式で算定する¹⁰⁾．

$$W = C_W A^{S_W} \quad (7)$$

$$D = C_D A^{S_D} \quad (8)$$

ここに $A[km^2]$ は当該河道区間の集水面積である．また， C_W, S_W, C_D, S_D の河道パラメータは，対象とする流域毎に入手可能な断面情報から推定する．

(3) 斜面部と河道部の水の流出入

河道が存在するグリッドセルにおいては，計算の各時間ステップで，斜面セルと河道セルの水の流出入を計算する．その流出入量は，河道の水位，斜面の水位，及び堤防高に応じて4つの場合分けを行い，段落式・越流公式を用いて計算する．

(4) 時間発展スキーム

(5) 式で表される微分方程式を適応時間ステップルンゲクッタ法で解く．同法は，通常のルンゲクッタ法で微分方程式を解法すると同時に，その誤差を推定する．RRIモデルはCash and Karp⁸⁾の提案した方法を採用し，5次の精度を有する6ステップルンゲクッタで次の時間ステップにおける水深を推定するとともに，4次の精度で計算した場合の水深を求めることによって両者の差から計算誤差を推定する．

(5) インダス川適用のためのモデル拡張

a) 本川沿いの堤防について

インダス川の下流部においては，本川から5～10 km程度離れた場所に道路や盛土があり，氾濫水の拡大を防ぐ堤防の役割を果たしている．本川沿いの堤防の影響を簡単に流出氾濫計算にさせるため，以下の取り扱いを行う．まず堤防のあるグリッドセルの標高を堤防の高さに相当するように嵩上げする．次に堤外地の粗度は氾濫原を代表する値に設定し，そこでは地中流や鉛直浸透流を考慮しない．堤外地の主河道については，式(7)，(8)で川幅と深さを設定したうえで，河川の流量を推定する際は，主河道を流れる流量に氾濫原を流れる流量を加算する．

b) 平野部の鉛直浸透流について

今回の洪水で主たる出水起源となったカブール川流域の山間部では，過去の森林伐採と乾燥・半乾燥の気候帯の影響によって，植生で覆われた場所が少なく，多くの場所で基岩が露呈している．基岩の地質は，変成岩や堆積岩が主体であり，それらが風化作用を受けて薄い土層を形成している¹¹⁾．急勾配の斜面上に形成された土壌中では，表層付近の早い地中流が発生し，それが飽和した場合に表面流が発生するものと想定される．従って，山間部においては，薄い土層厚を設定した中間流・表面流モデルの適用が妥当である．一方，インダス川流域の下流部には，農地・市街地として利用さ

図-1 インダス川流域と主要地点の位置関係

れている平野部が広がっており，そこではGreen Amptモデルを適用して，鉛直浸透による損失量を計算する．なお，本論では，Mack *et al.*¹¹⁾を参考に，勾配0.05を閾値として山地と平野部とに分けることにした．

3. 計算条件

本研究の対象領域は，Kotri 堰上流のインダス川全流域（面積：929,723 km²）とする．図-1中の星印（Kabul 地点を除く）は，インダス川本川沿いにあるダム・堰の位置を示す．2010年の洪水期間中は，Tarbela ダムで一部洪水調節が行われたものの，その効果は限定的であり，本研究の解析では洪水調節の効果を考慮しない．河川流量の再現性検証については，各ダム・堰における流入量の観測結果を用いる．また，Kabul 地点は水位計測に基づく流量推定値を比較対象とする．

本研究はHydroSHEDSに含まれる30 sec地形データセットを60sec(約1.7 km)に低分解能化して用いる¹²⁾．HydroSHEDSには標高・落水方向・集水面積を含み，落水方向と集水面積データは，河道の接続関係と形状を規定するために用いる．河道の幅と深さは(7)，(8)式で算定し，そのパラメータ(C_W, S_W, C_D, S_D)は，インダス川本川沿いの地形図・衛星画像を参考にしながら，それぞれ3.5, 0.4, 0.1, 0.4とした．ただし，河道深さの上限値は5 mとした．

表-1に今回の比較検討で用いた計算条件の一覧を，表-2に使用したモデルパラメータの値を示す．RRIモデルは，上述の通り2次元の拡散波近似モデルを基本構成としており，その条件を2D-Difと呼ぶ．一方，従来の分布型流出モデルと比較するために，地形勾配からあらかじめ落水方向を決め，キネマティックウェーブ法で追跡する場合を1D-Kin，1次元拡散波近似で追跡した場合を1D-Difと呼ぶ．以上の3ケースは本川も含

表-1 計算条件

1D-Kin	1次元 Kinematic Wave モデル
1D-Dif	1次元 Diffusion Wave モデル
2D-Dif	2次元 Diffusion Wave モデル
2D-Dif-Lev	2D-Dif + 堤防あり (破堤なし)
2D-Dif-LeB	2D-Dif + 堤防あり (破堤あり)

表-2 モデルパラメータ

	山地	平野	堤外
d (m)	0.1	0.0	0.0
k (m/s)	0.1	-	-
n ($m^{-1/3}s$)	0.15	0.15	0.15
Green Ampt 土質	-	Silty clay loam	-
n [river] ($m^{-1/3}s$)		0.015	

めて無堤を仮定する．それに対して，2D-Dif-Lev は本川沿いに比高 10 m の連続堤があることを想定した場合とする．2D-Dif-LeB は本川沿いに堤防があることを想定したうえで，2010 年の洪水で大きく破堤した場所には堤防が無いことを想定した条件とする．

計算対象期間は 2010 年 7 月 20 日 0:00(UTC) から 9 月 20 日 0:00(UTC) までの 62 日間とする．同期間の入力降雨分布は，図-1 に示す 93 地点で観測された日雨量を最近隣法で空間内挿して作成する．計算の初期条件は，完全に乾燥した状態を想定する．なお，RRI モデルは OpenMP による並列計算に対応しており，PC (Intel Xeon W3580, 3.33GHz, 4cores/8threads, RAM: 3.25GB) を用いた場合，62 日間の計算を約 10 時間で実行できる．

4. 計算結果

(1) 河川流量の再現性について

RRI モデルの適用結果を以下に示す．図-2 は主要地点の流量について，計算流量と観測流量との比較を示す．本論では，2次元拡散波近似による氾濫の再現が河川流量に及ぼす影響を確認するため，2D-Dif の結果と併せて，1D-Kin の結果を示す．

図中の Kabul 地点は，Sayama *et al.*¹⁾ で対象とした流域であり，本論のモデルパラメータは，同地域の 7 月下旬の出水を概ね再現できるように設定している．

インダス川中流部の本川に位置する Kalabagh 地点，Taunsa 地点，Chashma 地点，Guddu 地点の河川流量に着目する．この 4 地点については，計算・観測結果が概ね同じような傾向を示しており，1D-Kin ではピーク流量の出現が大きく・早くなり過ぎるのに対し，2D-Dif で氾濫を考慮しながら計算を行うことによって，観測流量をよく再現できるようになる．これらの 4 地点の計算流量の再現性を Nash 指標で評価すると，2D-Dif では 0.56 となった．後述する図-6 にはこの 4 地点の Nash 指標の平均値を Nash(Mid) として示している．

図-2 各地点の観測流量と計算流量との比較

表-3 流域水収支 (単位:mm) (斜面，河道は残留量)

	降雨	浸透	流出	斜面	河道
1D-Kin	267.8	143.7	106.3	11.5	6.3
2D-Dif	267.8	149.4	84.7	21.8	11.9

インダス川下流部の Sukkur 地点・Kotri 地点に着目する．両地点は，大規模な破堤地点の下流に位置している．2D-Dif の計算結果は，観測流量を過小に評価しており，本川から氾濫域への配分を妥当に再現できていない可能性がある．1D-Kin と比較しても 2D-Dif の流出量が小さくなるのは，計算終了時点での斜面・河道に残留している水の量が多いこと，また，浸透の総量が多いことによる (表-3)．この 2 地点の Nash 指標の平均値 (Nash(Down)) は 2D-Dif で 0.40 となっており，中流域のその値よりも低くなる．

本川の最上流に位置する Tarbela ダムについては，1D-Kin，2D-Dif とともに計算結果が観測流入量を過小評価する．Tarbela ダムの上流は，標高 6,000m を超える山岳地帯となっており，地点雨量の情報がほとんど入手できておらず，衛星観測降雨で補完している．

(2) 広域氾濫の再現性について

図-3 は計算期間中の最大浸水深を示している．また，中・下流域を拡大し，最大浸水深とあわせて MODIS による浸水想定域を赤線で重ねて示している．なお，こ

図-3 計算期間中の最大浸水深 (2D-Dif): (a) 中流域 (Mid) と (b) 下流域 (Down) の拡大図には MODIS による浸水域 (洪水期間中に一度でも浸水した地域) を赤線で重ねて標記。

図-4 下流域における洪水氾濫: 2D-Dif による計算と MODIS 画像との比較 (MODIS 画像は青い部分が水域)。

の浸水想定域は、2010 年の洪水期間中に撮影された複数の MODIS 画像をもとに、同期間中に一度でも浸水したと判断された地域である。

まず、中流域では、拡大図の西側に位置する本川沿いに加えて、Jhelum と Chenab と呼ばれる支川沿いで浸水したことをモデルは示している。この地域には、その南側にも主要なインダス川支川が位置しており、そのうちの上記の二支川でとくに浸水域が広がっていることを MODIS 分析結果からも確認できる。

本論では、氾濫域の再現性を示す定量化するために、以下の FIT 指標⁷⁾を用いる。

$$FIT = \frac{IA_{obs} \cap IA_{sim}}{IA_{obs} \cup IA_{sim}} \quad (9)$$

図-5 (a) 堤防が破堤しないことを仮定した場合 (2D-Dif-Lev) の下流域における最大浸水深、(b) 堤防ありの場合 (2D-Dif-Lev) と無堤の場合 (2D-Dif) の最大浸水深の差

ここに、 IA_{obs} 、 IA_{sim} はそれぞれ衛星およびモデルで推定された浸水域であり、この指標が 1 に近いほど両者が整合したことを意味する。なお、 IA_{sim} については、計算期間中の最大浸水深が 1 m を超えたグリッドセルについて計上した。図-3 中の右上に示した中流域 (Mid) で計算した FIT 指標は 0.30 となる。

次にインダス川下流域に着目する。図-4 の時系列からも分かるように、この地域では、洪水が本川 (南東側) の右岸側から氾濫し、本川から約 100 km も西側に離れて流れた。実現象としては、堰の上流で堤防が一部決壊して氾濫水が広がったとの報告がある。2D-Dif の計算は、堤防を考慮しない計算であるが、それでも概ね氾濫水の挙動を再現できる。なお、詳細に見れば Sukkur 堰の左岸側などの一部地域では、MODIS によれば浸水していないにもかかわらず、モデル結果は浸水している場所がある。これは破堤した場所を除く堤防の考慮 (2D-Dif-LeB) で改善する。ただし、 FIT 指標で判断した場合の再現性はそれほど顕著に改善されることはなく、2D-Dif の場合は 0.41 であるのに対し、2D-Dif-LeB の場合は 0.44 となる。

(3) 堤防の効果について

本川沿いの堤防が破堤しなかった場合を 2D-Dif-Lev としてシミュレーションとする。図-5 の赤線で示した場所は堤防の位置を示している。黄線で示した場所は今回の洪水で堤防が決壊した場所である。2D-Dif-Lev の計算では両者に堤防があることを、2D-Dif-LeB では赤線の場所のみに堤防があることを想定して計算する。また、図中の青線の部分は、氾濫水が Manchar 湖に流入してから本川に戻る場所であり、両条件ともこの部分の堤防が無いものと仮定した。

2D-Dif-Lev による下流部の最大浸水深を図-5(a) に、2D-Dif との最大浸水深の差を図-5(b) に示す。図-5(b) の値が負の場合は、堤防によって浸水深が低減したことを、正の場合は堤防によって逆に水位が上昇したことを示唆する。2D-Dif-Lev の条件では、本川から堤内地に水が溢れ出ることはなくなり、堤内地はほとんど浸水していない。一方、河川や氾濫原の水位は約 2m 上昇しており、堤防が決壊しなければ周辺市街域の洪水リスクが高まる。また堰のある地点では堤防の区間が狭

図-6 中流域 (Mid), 下流域 (Down) における河川流量 (Nash)・洪水氾濫 (FIT) の評価指標値

くなっており, その影響で破堤地点周辺の水位が上昇していることを計算結果は示唆している。

(4) モデルの複雑性と再現性について

全ての条件による計算結果を図-6 にまとめる。中流域 (Mid) と下流域 (Down) について, 河川流量を Nash 指標, 洪水氾濫を FIT 指標で評価する。2D-Dif の結果を基準に考えると, 1D-Kin は流出・氾濫ともに再現性が悪い。1D-Dif は河川流量を過大評価するが, その波形は 2D-Dif に類似している (図は省略)。1D-Dif の氾濫計算結果は, 中流域の河川沿いの氾濫を概ね再現できるのに対し, 下流域の大規模な氾濫は 1 次元計算では全く再現できない。

堤防の考慮については, 破堤の影響を反映させない場合 (2D-Dif-Lev) は, 無堤の場合 (2D-Dif) よりも下流域の流量・氾濫の再現性が大幅に低下する。破堤地点だけ堤防を付けない 2D-Dif-LeB は下流部の氾濫計算の結果が 2D-Dif に比べて向上するものの, FIT 値で評価した場合には, その効果は限定的である (0.41 から 0.44 に向上)。従って, 破堤の情報などが十分に得られない状況下では, まずは無堤を仮定した 2 次元の降雨流出氾濫計算を実行することが, 災害対応のための情報提供のためには有効であると考えられる。

5. おわりに

本研究は, インダス川全流域を対象に, 降雨流出氾濫モデルを適用し, 2010 年パキスタン洪水の再現性を検証した。モデルの計算結果は, 中流域の河川流量, 下流部の大規模洪水氾濫を概ね再現できた。堤防の取り扱いなど計算条件の異なる 5 種類のモデリングによる結果から, 災害対応時の情報提供を目的としたモデリングとして, まずは無堤を仮定した 2 次元の降雨流出氾濫解析が望ましいことが分かった。また, 同モデルによる解析は, 洪水氾濫リスクの高い地域を特定したり, 堤防等の影響を定量評価したりするうえで有効な方法となり得ることが分かった。

本論のモデル適用においては, 支川のカブル川で使用したモデルパラメータ¹⁾を直接利用した。カブル川の適用では計算負荷が比較的小さいため, 簡単なパラメータ感度分析を実施することができた。一方, 今回の適用では, 計算負荷が大きく結果の不確実性を定量化できていない。今後, 観測情報を十分に得られない地域にモデルを適用していくうえで, パラメータの設定方法とそれに伴う不確実性を明らかにすることが大切である。

謝辞: 科学研究費補助金若手研究 (B) 22760379 (代表: 佐山敬洋) の補助を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami, K.: Rainfall-runoff-inundation analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, *Hydrol. Sci. J.*, 2011, (in print).
- 2) 佐山敬洋, Lin, N.M., 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, 55, S529-S534, 2011.
- 3) Kazama, S., Kono, T., Kakiuchi, K. and Sawamoto, M.: Evaluation of flood control and inundation conservation in Cambodia using flood and economic growth models, *Hydrol. Process.*, 23(4), pp. 623-632, 2009.
- 4) Dutta, D., Alam, J., Umeda, K., Hayashi, M. and Hironaka, S.: A two-dimensional hydrodynamic model for flood inundation simulation: a case study in the lower Mekong river basin, *Hydrol. Process.*, 21, pp. 1223-1237, 2007.
- 5) Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H. and Oki, T.: A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, *Water Resour. Res.*, 47, W04501, 2011.
- 6) Bates, P.D. and De Roo, A.P.J.: A simple raster-based model for flood inundation simulation. *J. of Hydrol.*, 236, pp. 54-77, 2000.
- 7) Hunter, N.M., Bates, P.D., Horritt, M.S. and Wilson, M.D.: Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review. *Geomorphology*, 90, pp. 208-225, 2007.
- 8) Cash, J.R. and Karp, A.H.: A variable order Runge-Kutta method for initial value problems with rapidly varying right-hand sides, *ACM Trans. on Math. Software*, 16(3), 201-222, 1990.
- 9) Takasao, T. and Shiiba, M.: Incorporation of the effect of concentration of flow into the kinematic wave equations and its applications to runoff system lumping, *J. of Hydrol.*, 102, pp. 301-322, 1988.
- 10) Carpenter, T.M., Sperflage, J.A., Georgakakos, K.P., Sweeney, T. and Fread D.L.: National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems, *J. of Hydrol.*, 224, pp. 21-44, 1999.
- 11) Mack, T.J. et al.: Conceptual model of water resources in the Kabul Basin, Afghanistan. USGS Afghanistan, 168, Scientific Investigations Report, 2009-5262, 2009.
- 12) 舩谷敬一, 赤井計之, 馬籠 純: 格子状擬河道網のスケール変換に関する新しい方法, 水文・水資源学会誌, 19(2), pp. 139-150, 2006.

(2011.9.30 受付)