

# ネスティングモデルを用いた バングラデシュ・ジャムナ川における洪水氾濫リスク評価

## Risk Assessment for River Flood on Jamuna River in Bangladesh Using A Nested Flood Simulation Model

橋本 雅和・川池 健司・中川 一

Masakazu HASHIMOTO, Kenji KAWAIKE and Hajime NAKAGAWA

### Synopsis

The main objective of this study is to assess the risk of river flooding from the Jamuna River by using a two-dimensional flood simulation model. Firstly, we examined the methods of the nested flood simulation model focusing on the situation where dry beds are frequently present. Secondly, methods were applied to the target area in Bangladesh. Consequently, the results of the nested method using water depth were superior on the viewpoint of flooded area, depth and volume. Also, the simulation result showed good agreement in terms of the extent of flooding. For the further research, consideration of the roughness depending on the grid size was suggested.

キーワード: ネスティングモデル, 氾濫解析, ドライベッド, 複雑地形

**Keywords:** Nested model, flooding analysis, dry bed, uneven terrain

## 1. はじめに

バングラデシュは典型的な洪水氾濫常習地であり、約 10 年に一度の間隔で大規模な洪水氾濫が発生する。特に、1987 年、1988 年の洪水氾濫の被害は甚大で、国の約 2/3 が冠水する程の浸水災害が起こった。当地域では様々なタイプの浸水災害が生じており、河川氾濫、フラッシュフラッド、都市氾濫、高潮氾濫などがあるが、本研究では河川氾濫によるリスクを対象にしている。バングラデシュ国内にはガンジス川、ジャムナ川、メグナ川の三つの大河川が流れており、北西部を流れるジャムナ川周辺地域の河川氾濫による被害が著しい。河川氾濫で危惧される被害は、農業被害や水系感染症の蔓延などがあり、洪水氾濫リスクの評価に対する社会的な需要は高い。

このような、大陸巨大河川の洪水氾濫を対象にして解析を行う場合、研究対象地域は大規模にならざるを得ない一方で、住民側への出力に要求される解像度は都市であればどの流域であろうと詳細なものでなくてはならない。通常は必要解像度と計算コストを考慮して、対象領域、計算格子、タイムステップなど、計算負荷を左右する要因を適宜設定することになる。大陸

河川の流域スケールであれば数  $km$  の計算格子が用いられ、都市スケールでは数  $m$  の計算格子が用いられる。ただし、発展途上国などのデータの整備が遅れている地域では、計算コストよりも使用可能なデータに依存して計算格子を決定する場合が多い。最近では、UAV を用いた簡易的な地形測量が行えたり、高精度の衛星標高データが有償で入手できるため、疎密な計算格子を組み合わせたネスティング計算法は、広域を対象としながらも必要な出力解像度を満足する、有効な解析法の一つと言える。

ジャムナ川の洪水氾濫については、関連する様々な既往研究があり、衛星画像を使った浸水マップ作成に関する研究 (Islam et al., 2010)、沿川の堤防の侵食メカニズムと水理学的特性に関する研究 (Nakagawa et al., 2013)、洪水氾濫による農業被害に関する研究 (Paul, 1984)、河道内の砂州の三次元構造に関する研究 (Best et al., 2003) などが挙げられる。しかし、洪水氾濫を数値モデルで解析した研究は少なく、バングラデシュ洪水予警報センター (Flood Forecasting and Warning Center) がバングラデシュ全土で洪水氾濫計算を行っているが、解像度が粗いため地方スケールのリスク評価であり、都市

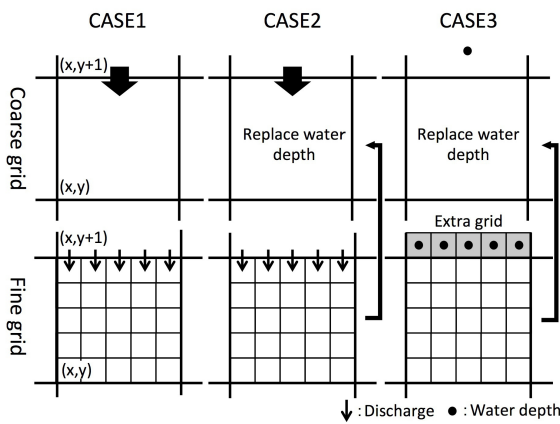


Fig. 1 Simplified figure for nesting methods.

スケールのリスク評価までは行っていない。

また、ネスティング計算法に関しては、洪水氾濫のネスティング計算法として佐藤ら (2005) や武田ら (2009), 田中ら (2014) によって報告されている研究は存在するものの、適用例は少なく、起伏の著しい地形においてドライベッドが多く現れるような条件でのネスティング計算法はいまだ開発されていない。このような状況の中で著者らは氾濫解析におけるネスティング計算の法の開発を進めていたが、蒸発と浸透を考慮されていないなど、いくつかの課題が残されていた (橋本ら, 2015)。また、大陸巨大河川の洪水氾濫などを対象にする場合には数ヶ月の解析を行うことも多く、そのような長期間の解析においてもネスティング計算法の計算効率を期待できる。

そこで本研究は、1) ドライベッドを有する場に適用可能かつ、蒸発散・浸透を考慮し得るネスティング手法を開発すること、2) 大陸巨大河川における洪水氾濫計算に適用し、起伏の著しい地形への適用性を検討すること、3) バングラデシュ北西部のガイバンダ地区における洪水氾濫リスクを評価することを目的とする。

## 2. 研究手法

本研究では三つのネスティング手法を使って計算を行い、全ての領域に細かい標高データを使った参照計算と比較を行った。それぞれの手法の特徴について考察した上で、参照計算に一番近い結果になった手法を用いて、ネスティング領域において洪水氾濫リスク評価を行った。

### 2.1 氾濫モデル

本研究では、河道の流れと氾濫流を一体に平面二次元モデルで解析した。大グリッドを用いる領域 (以下

「大領域」)、小グリッドを用いる領域 (以下「小領域」) とともに、以下の基礎式を用いる (式 (1), (2))。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q_r - q_e - q_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (2a)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (2b)$$

ここで、 $h$ : 水深 (m),  $H$ : 水位 (m),  $M, N$ :  $x, y$  方向の単位幅あたりの流量フラックス ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $u, v$ :  $x, y$  方向の流速 (m/s),  $q_e$ : 単位面積あたりの蒸発散量 (m/s)  $q_i$ : 単位面積あたりの浸透量 (m/s)  $q_r$ : 降雨量 (m/s) である。

### 2.2 氾濫解析におけるネスティングモデルの問題点

ネスティングした小領域の外部境界条件として、大領域で計算された流量を受け渡す際の様子を Fig. 1 に示す。小領域の境界に十分な水量がある場合、同じ単位幅流量を与えることで、大小の両領域で同じ流量のやりとりをすることができる。海岸工学分野では様々なネスティング手法が開発されており、Laurent et al. (2008) によってその接続方法が紹介されている。

しかし、本研究のように氾濫現象を対象とする場合、小領域の境界にドライベッドが存在することが少なくないため、流量のやりとりに特別な取扱いが必要になる。このような接続境界でのドライベッドの処理は、洪水氾濫におけるネスティングモデル特有の問題である。また、浸透や蒸発散を考慮する場合では大小両領域の浸水面積が異なるためそれぞれの水収支を合わせるための特別な取扱いが必要である。

### 2.3 ネスティング計算法

本研究では、Fig. 1 に示した3種類のネスティング手法を使って氾濫計算を行う。また、計算領域すべてに小グリッドを用いた場合の解析結果を比較対象として、ネスティング手法による解析結果の妥当性を検証した。以下にそれぞれの接続方法と蒸発散量・浸透の考慮方法を示す。

#### (1) 流量受け渡しモデル (Case1)

本手法では、小領域の外部境界に大領域の流量を与える 1way 手法を基本とした。ここで、小領域の外部境界にあたるグリッドでは dry/wet の問題により、小領域から流出する場合に、大領域との流量に差異が生じる場合がある。よって、小領域から流出する場合の流量計算は、小領域の外部境界における水深に応じて配

分した上で(式(3)),小領域から流出する流量が大領域と異なる場合に限り,小領域の流量を大領域との接続部分に反映させる(式(4))2way手法を採用した.また,流量の受渡しはタイムステップ毎に行った.

$$q_i^f = q^c + \left( \sum q_{dry}^f \right) \frac{h_{i,wet}^f}{\sum h_{wet}^f} \quad (3)$$

$$q^c = \frac{\sum q^f dx^f}{dx^c} \quad (4)$$

ここで,  $q$ : 単位幅流量,  $q_{dry}$ : ドライベッドに割り当てられた流量,  $h_{wet}$ : 氾濫水が存在する格子に水深,  $dx$ : グリッドの辺長, 肩記号の  $f, c$  はそれぞれ小グリッド (fine grid), 大グリッド (coarse grid) の物理量であることを表している.

## (2) 流量受け渡し-水位置き換えモデル (Case2)

CASE2の接続はCASE1の手法に加えて,大領域の格子に対応する小領域格子の総水量を大領域の格子面積で除すことによって,大領域の格子の水深に反映させる(式(5)).この水深の置き換え操作は運動方程式が満足されない形で実施されているため,物理的に不自然な計算結果が得られることが報告されているが(二瓶ら,2008),本手法では小領域での計算結果に重きを置き,連続式のみを満足させて接続を行った.

$$h^c = \frac{\sum (h^f dx^f dy^f)}{dx^c dy^c} \quad (5)$$

ここで,  $dx, dy$  は  $x$  方向,  $y$  方向の格子幅をそれぞれ示す.

## (3) 水位受け渡し-水位置き換えモデル (Case3)

本手法は武田ら(2009)によるh-VA手法を用いたネスティング計算法を参考にしたもので,大領域で計算された水深を小領域の周りに1グリッド余分に用意されたグリッドに与え,それぞれのグリッド間で小領域境界での流量の計算を行う.さらに,小領域で計算された流量を総和し,大領域の格子幅で除すことで大領域へ流量を反映させた.こちらの手法においても水位の受渡しはタイムステップ毎に行った.なお,大領域のネスティングされた領域における水位はCASE2と同様に空間平均したものを大領域の計算結果と置き換えている.

## (4) 蒸発散量の計算

蒸発散量の計算にはソーンスウェイト法(Thornthwaite,1948)を用いる.本手法によって求められる可能日蒸発散量を式(6),(7)に示す.

$$E_p = 0.553 D_0 \left[ \frac{10 T_i}{J} \right]^a, J = \sum_{i=1}^{12} \left[ \frac{T_i}{5} \right]^{1.514} \quad (6)$$

$$a = 6.75 \times 10^{-7} J^3 - 7.71 \times 10^{-5} J^2 + 1.79 \times 10^{-2} J + 0.492 \quad (7)$$

ここで  $E_p$  は  $j$  月の平均蒸発散能力 ( $mm/day$ ),  $T_i$  は  $j$  月の月平均気温,  $D_0$  ( $hr/12hr$ ) は月平均日照時間,をそ

れぞれ示す.月平均気温はバングラデシュ気象局によりロンプール地区において観測されたデータを用いた.本手法は,湿潤地域では過大評価することが指摘されているが,対象領域における蒸発散量の気温変化を考慮するために適用した.参考までに,計算された年平均可能日蒸発散量は  $4.15 mm/day$  であった.

## (5) 浸透量の計算

浸透の計算にはGreen Amptモデルを用いる.本手法によって求められる浸透量を式(8)に示す.

$$f = K_s \left[ 1 + \frac{S_f(\phi - \theta_i)}{F} \right] \quad (8)$$

ここで  $f$  は浸透能 ( $m/s$ ),  $F$  は累積浸透量 ( $m$ ),  $S_f$  は湿潤前線における吸引圧 ( $m$ ),  $\phi$  は土壌の空隙率,  $\theta_i$  は初期の体積含水率,  $K_s$  は鉛直方向の飽和透水係数 ( $m/s$ ) をそれぞれ示す.上式において,地表面に浸水が生じていない場合には累積浸透量水分が蒸発することを考慮している.

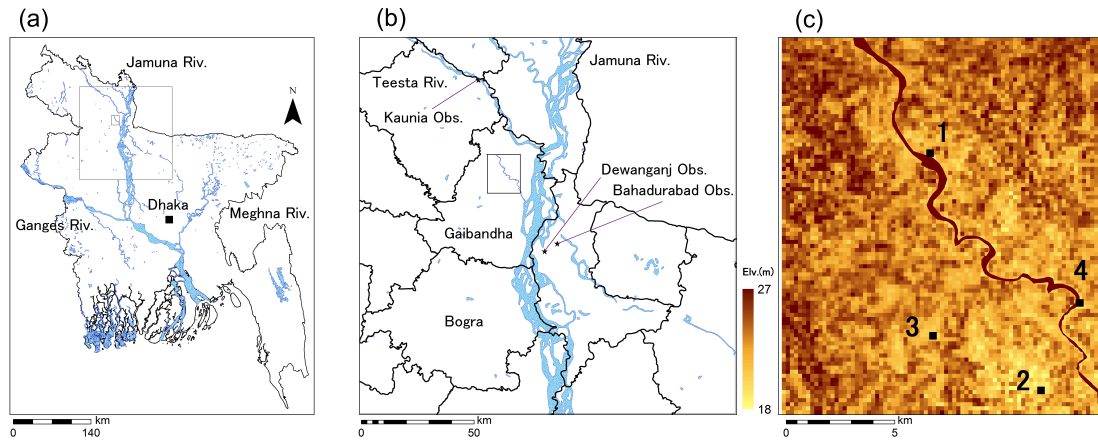
前節で述べた通り,大領域と小領域の浸水面積が異なるために,蒸発散・浸透による水収支を合わせるための取り扱いが必要である.本研究では,小領域で計算される水面積に重きを置き,Case1では小領域で計算された蒸発散・浸透量を大領域に返すことで,Case2,3では水深の置き換えを行うことで,大領域においても蒸発散・浸透が考慮されることとした.

## 2.4 計算条件

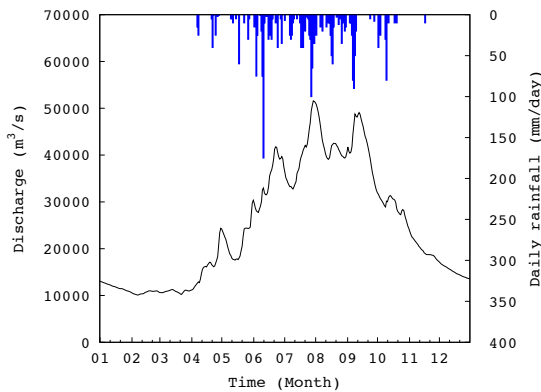
バングラデシュ北西部のジャムナ川周辺の地域を対象として,2007年1月1日から12月31日までの通年の洪水氾濫計算を行った(Fig.2(a),(b)).また,ネスティング対象地域は,浸水常習地であるガイバンダ(Fig.2(c))を選んだ.当地域はジャムナ川の支流があり,雨期に本川から遡上する流れによって浸水する.

標高は衛星標高データ(SRTM)を用い,大領域は空間解像度30秒(930m),小領域は6秒(約186m)とした.6秒グリッドについては3秒グリッドとして米国地質調査所(USGS)より発行されているデータを逆距離加重法により補間して作成した.大領域は  $180 \times 180$  の32,400グリッド,小領域は  $95 \times 80$  の7,600グリッドで計算を行った.なお,堤防高は2.0mを一様に仮定してグリッド間に考慮し,粗度係数は計算領域全体に0.030を用いた.

ジャムナ川の河川流量はバングラデシュ水資源省(Bangladesh Water Development Board:以下BWDB)によりBahadurabad観測所(大計算領域ほぼ中央:Fig.2(b))で得られた日平均流量データから支流のTeesta川の流量を差し引いて上流端に与えた.計算に用いた2007年のジャムナ川の日平均流量をFig.3に示す.7月28日(208日目)が洪水のピークであり,9月9日(251



**Fig. 2** Tagret area. (a) Map of Bangladesh (the rectangle located in the central-western section indicates the large calculation area); (b) Large calculation area (the rectangle located in the central-west part section, indicates the small calculation area); and (c) small calculation area.



**Fig. 3** Discharge of the Jamuna River in 2007.

日目)に二度目のピークがあるのが特徴である。支流の Teesta 川の河川流量は Kaunia 観測所 (計算領域左上: **Fig. 2** (b)) で得られた水位データを等流公式により流量に変換し、上流端 (計算領域左上) に与えた。対象領域内の降水データは BWDB により Dewanganj 観測所 (大計算領域ほぼ中央: **Fig. 2** (b)) で得られた観測雨量を用いた。

シミュレーションの浸水域再現精度の検証として、AquaMODIS による 2007 年 8 月 3 日の衛星画像を用いた。

また、ネスティング計算結果の比較のために大領域全てに小グリッドを適用した解析を実施し、CASE4 とした。本研究では、CASE4 の結果を比較対象とし、浸水深時系列、浸水体積を比較した。浸水深時系列の比較については **Fig. 2** (c) に示した 4 点の水深で行う。水深比較地点については、浸水が始まる境界付近で 2, 4 の 2 地点、小領域の内側の入り組んだ地形の場所で 1, 3 の 2 地点を選出した。

### 3. ネスティング計算の結果・検証

#### 3.1 浸水域の比較

小領域の CASE 毎の浸水域の比較を **Fig. 4** に示す。図はそれぞれ計算開始 215 日後、CASE4 の結果において浸水体積が最も大きかった時の浸水域を表している。それぞれの結果に大きな違いは見られなかったが、図中の右下部分に注目すると CASE4 に一番近い結果を表したのは CASE3 であり、CASE1 は過小評価、CASE2 は過大評価であった。CASE3 の浸水域は CASE4 とほぼ一致していたが、部分的に過小評価が見られた。CASE1, 2 の過大評価については、格子幅の大きいグリッドを使った計算では小領域で見られるような微地形による起伏が考慮されず、浸水の進みが早くなった結果が影響したものと考えられる。CASE1, 2 は大領域で計算される流入量に大きく依存するため、これが過大評価につながったと考えられる。武田ら (2009) により報告されているように、格子幅の大きいグリッドは微地形が平滑化され、底面粗度を適切に表現できていないことが考えられる。

計算速度については、参考までに 365 日分の計算を行うのに、CASE1, 2, 3 では計算実時間で 1 日、CASE4 では 10 日を要した。

#### 3.2 浸水深の比較

**Fig. 2** に示した 4 地点での浸水深時系列を **Fig. 5** に示す。ここで、浸水深を表示したそれぞれの地点で浸水が始まったのは 160 日後であったため、時系列を 150 日後から示している。浸水深ピーク時刻と最大浸水深を **Table 1** に示す。まず、全ての地点において、CASE4 と一番近い時系列を示したのは CASE3 であった。浸水深ピークでの浸水深の値も近く、その差異は最大で 0.1m

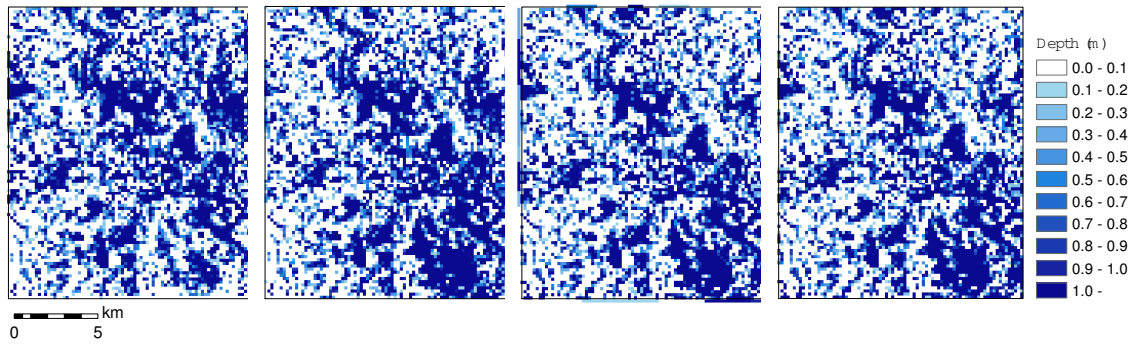


Fig. 4 Comparison of simulation results on 215th day (Case1, 2, 3 and 4 from the left).

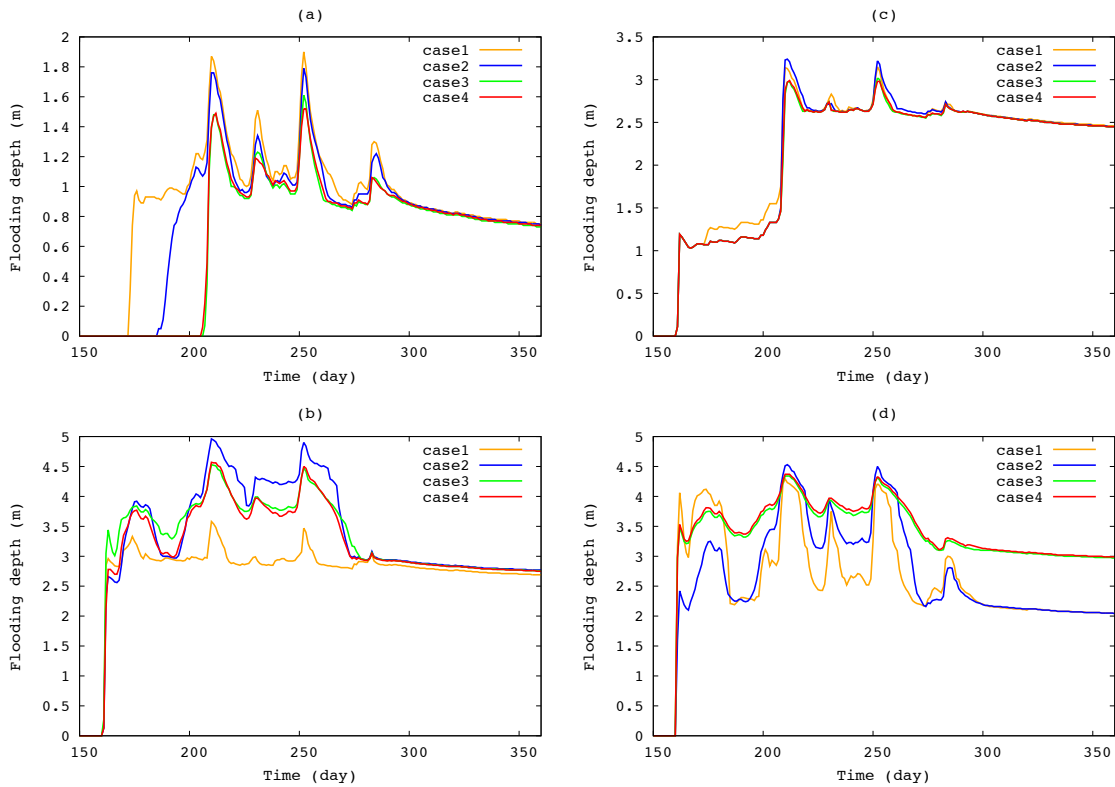


Fig. 5 Flooding depth time series.(a)Point1, (b)Point2, (c)Point3, (d)Point4.

Table 1 Flooding depth peak time and maximum flooding depth.

	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Case 1	254 (1.9)	212 (3.6)	212 (3.1)	212 (4.3)
Case 2	254 (1.8)	212 (5.0)	213 (3.2)	213 (4.5)
Case 3	254 (1.6)	212 (4.5)	214 (3.0)	212 (4.3)
Case 4	254 (1.5)	212 (4.5)	214 (3.0)	212 (4.4)

unit: day(m)

であった (Table 1). また、浸水深ピーク時刻については1日以内の差異であった。既往の研究(橋本ら, 2015)では浸水到達時間の違いについて考察しているが、本研究ではそれぞれのケースが降雨の始まりと共に浸水

が始まっているため、特に大きな差異はなかった。浸水深の計算終了時の値は三つの地点(Point1,2,3)でほぼ一致していたが、接続境界に一番近いポイント4ではCASE1,2とCASE3,4で結果が異なった。これは境界における流量のやりとりに依存していると考えられ、流出入量が極端である大領域の計算結果に影響を受けたCASE1,2では洪水が引いて行く時に、小領域の境界格子の流向が領域の外向きになり、大きく流出したものと考えられる。

### 3.3 浸水体積の比較

ネスティング領域内の浸水体積時系列を使っての比較を Fig. 6 に示す。ここで、小領域で浸水が開始する

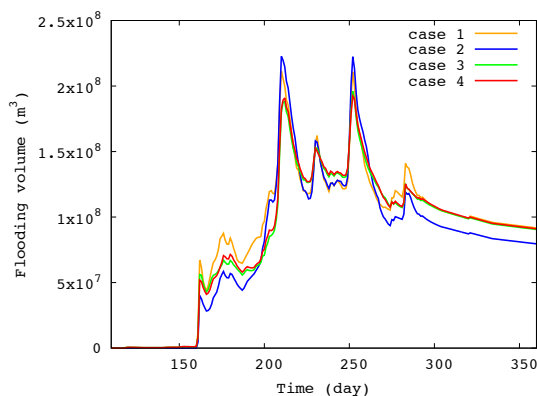


Fig. 6 Flooding volume time series.

Table 2 The peak time of flooding volume and the flood reaching time.

	Flood peak time	Flood start time
Case 1	210 (2.11)	155
Case 2	210 (2.27)	155
Case 3	211 (1.87)	118
Case 4	212 (1.91)	118

unit: days( $10^8\text{m}^3$ )

までの時間を省略し、110日後からの結果を表示している。浸水体積のピーク時刻と浸水体積及び浸水開始時刻を Table 2 に示す。浸水深時系列を使つての比較に見られた傾向と同様に、浸水体積の場合も CASE4 に一番近かったのは CASE3 であった。しかし、CASE3 の結果に若干の過小評価が見られた。これは接続境界で運動量の受け渡しがされていないことが原因であると考えられる。

一方で、CASE2 も CASE4 に近い波形を示したが、洪水ピークの前後で過小評価と過大評価が著しかった。また、CASE1 は全体的に過大評価であり、大領域で計算された流量を受け渡したことが過大評価の原因であることが考えられる。大小領域の境界でやりとりされる流量について、CASE3 で境界格子のそれぞれで異なる流向が計算されるのに対して、CASE1, 2 では大領域で計算された流向がそのまま小領域の境界での流向になるため、流出と流入の際の水の出入りが激しく、過大及び過小評価を引き起こす原因となっていると考えられる。

## 4. 洪水氾濫リスク評価

### 4.1 計算結果の検証

計算結果と衛星画像の比較を Fig. 7 に示す。計算結果は計算開始 214 日後を表しており、衛星画像は同時



Fig. 8 Dyke breach site (Aug. 10 2014).

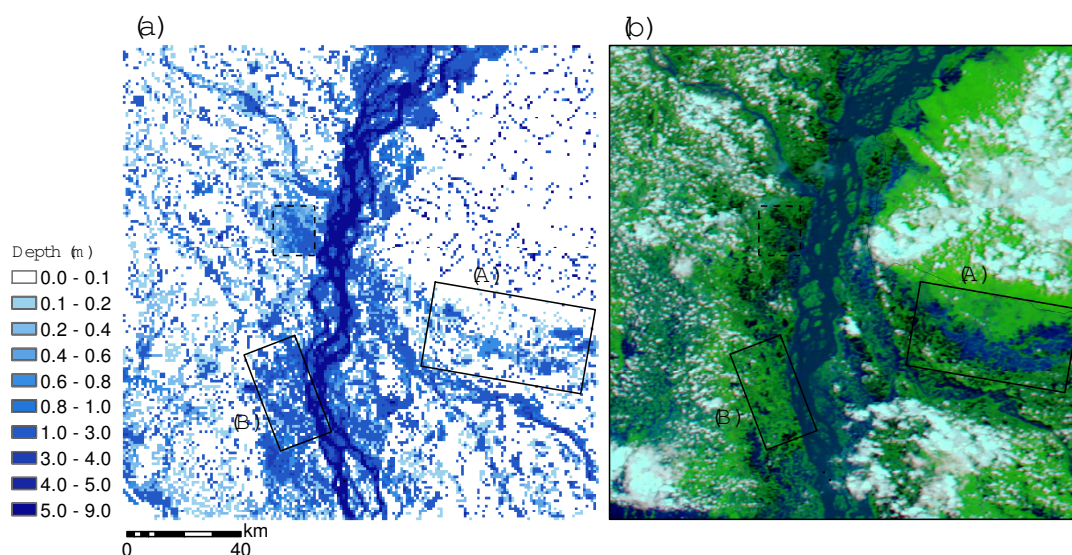
期に撮影されたものである。比較より、計算結果は浸水域を大方良好に再現できていることがわかる。しかし、いくつかの部分で過大・過小評価が見られたため、以下に考察を加える。まず、図中の (A) の部分では過小評価が見られた。これは降雨の考慮方法が影響したものと考えられる。本研究では Dewanganj 観測所で観測された雨量を対象領域全体で均一に考慮しており、過小評価はその結果と考えられる。Megaraya 山脈の南部ではその影響が特に顕著であった。

次に、図中の (B) の部分では過大評価が見られた。こちらの差異については、堤防と河床高の考慮方法が影響したものと考えられる。本研究では堤防高を一律に 2.0m としており、河床高は USGS より提供されているデータを加工せず、固定床として用いた。しかし、実際には堤防高は 2.0m 以上の場所もあり、河床は一年を通して変化するため (Ashworth et al., 2000)、これらが原因となって過小評価になったと考えられる。また、2014 年に行った現地観測では破堤箇所も見られたため (Fig. 8)、今後の研究で考慮する必要がある。

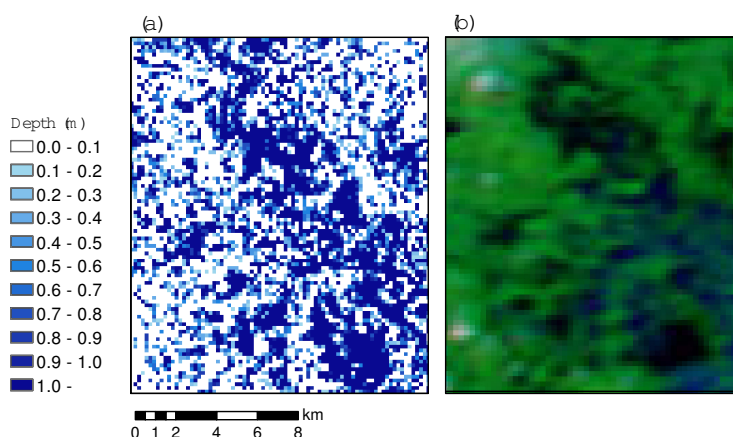
ネスティング領域の計算結果と衛星画像の比較を Fig. 9 に示す。洪水リスク評価では参照計算と一番近い結果を示した case3 の結果を用いている。こちらも浸水域を良好に再現しており、細かい格子を使ったことで浸水域がより詳細に再現されていることがわかる。さほど大きい差異は見られないが、小規模な水たまり程度の浸水部分で差異が見られるため、今後の研究では小河川や排水路の考慮が必要である。参考までに、ネスティング計算を行った計算は全体に細かい格子を使った場合の計算実時間の 10 分の 1 程度であった。

### 4.2 住宅地の浸水状況

ネスティング計算領域の土地利用図を Fig. 10 に示す。図は Bangladesh の機関である地方行政技術局 (Local Government Engineering Department: 以下 LGED) が発行している地図から著者が必要な情報のみ示したもの



**Fig. 7** Validation of the simulation result using satellite image on Aug. 3 2007 for the case of large calculation area. (a) Simulation result. (b) Satellite image.



**Fig. 9** Validation of the simulation result using satellite image on Aug. 3 2007 for the case of small calculation area. (a) Simulation result. (b) Satellite image.

である。当該地域は鉄道の沿線であることから、全体的に住宅地が存在している。住民は集落を作って生活しており、大きい集落で  $1\text{km}^2$ 、小さい集落で  $100\text{m}^2$  程度の集落が形成されている。リスク評価の細かさにもよるが、集落毎のリスクの違いを評価する場合には数  $100\text{m}$  の格子幅で解析を行う必要があることがわかる。

上記の集落部分における浸水の割合を示したのが **Fig. 11** である。結果から、約 4 割の集落で  $0.3\text{m}$  以上の浸水が発生し、3 割の集落で  $0.5\text{m}$  以上、2 割の集落で  $1.0\text{m}$  以上の浸水が発生することがわかった。また、2 割弱の集落では洪水イベント後も  $0.3\text{m}$  以上の浸水が長期的に続くことがわかった。

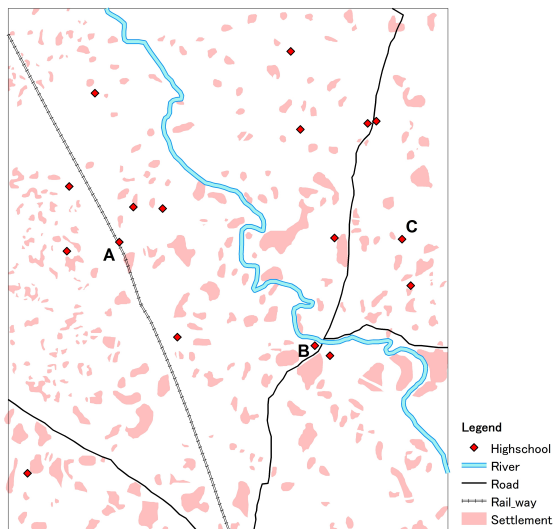
リスク評価手法としては浸水深から被害額を算定することも考えられるが、集落によっては浸水を事前に予

想して床の高い住居を構えていることもあるため、浸水によって想定される被害を現地調査することが更なるリスク評価のための課題である。

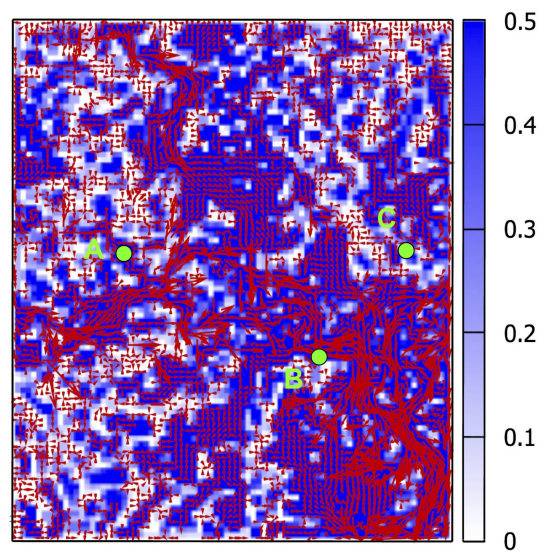
### 4.3 氾濫水の流況

対象領域の氾濫水の流況を **Fig. 12** に示す。図は計算開始 214 日後の一回目の浸水ピークの時の様子を表している。浸水は大方河川部分に沿って進んでいる様子が現れているが、図左中央部分の方角への流れがあることがわかる。

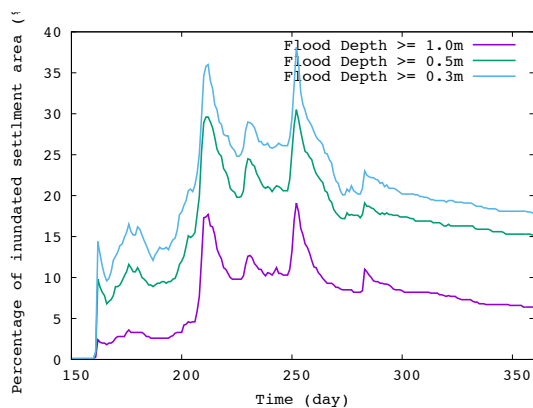
対象地域では急流が発生することは稀であり、本研究でシミュレーションされた 2007 年の洪水でも急流は認められなかった。しかし、相対的に流速の大きい場所では 2007 年以上の大洪水の際に急流が発生する可能



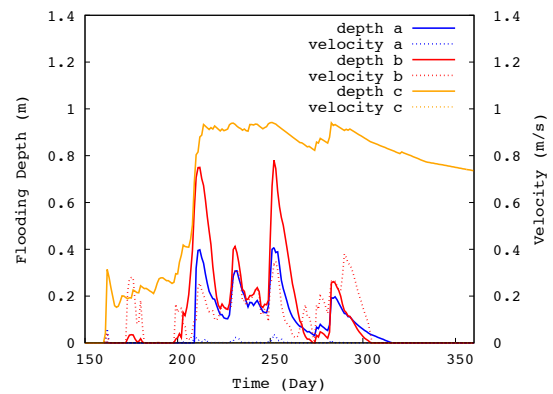
**Fig. 10** Land use map of the nesting target area (remade based on a published map by Local Government Engineering Department).



**Fig. 12** Flooding depth and flow direction in the target area (Red vector indicates flow direction and velocity).



**Fig. 11** Parentage of the flooded area.



**Fig. 13** Flooding depth and velocity on evaluation points.

性があり、注意が必要と考えられる。また、有害物質の拡散や水系感染症の流行を考える場合、水の流れが続いている地域では広がりやすいことが考えられ、流れの無い場所では有害物質等が堆積することが考えられる。

バングラデシュのように月単位で長期的に浸水する地域では、流体力の大きい流れによって、家が流されるなどの被害は少ないが、避難で使われるボートの操縦が困難になる状況や、有害物質の拡散などによる被害が想定されるため、こちらも現地調査を通して予測し得るリスクをリストアップすることが今後の課題である。

#### 4.4 避難場所候補地の浸水深と流速の特徴

本研究では対象地域内の高校の建物を避難場所として想定し、地理条件の異なる3つの地点を選んで、水深

**Table 3** Maximum flood depth and velocity on each points.

	Max. flood depth	Max. velocity
Point A	0.41 m	0.061 m/s
Point B	0.78 m	0.380 m/s
Point C	0.94 m	0.001 m/s

と流速を比較した。それぞれの地点での浸水深と流速の時系列を **Fig. 13** に、最高浸水深、最高流速を **Table 3** に示す。前述の通り、急流が発生する場所はなかったが、高校 B では相対的に流速が大きかった。当地域は 0.8m 程度の浸水も確認されたため、河川氾濫の影響を受けやすい場所であることがわかる。また、浸水深に同様の変動が見られたのが、高校 A であったが、こちらは流速が小さく、浸水深も 40cm 程度であったため、本研究で選ばれた3地点の中で一番避難場所に適している場所であった。一方で、高校 C のように流速は小



さいが、0.8m程の浸水が長く続く場所もあり、場所によって浸水形態が様々であることがわかった。

このような評価を行うことで、現存する建物の避難場所としての安全性を知ることができる他、新しく避難用のシェルターを建設する場合にも、浸水深と流況を考慮することによって適切な避難場所の決定をすることができる。

## 5. おわりに

本研究では、ドライベッドが頻繁に出現するような場合のネスティング計算法を提案し、起伏の著しい地形の計算及び、通年規模の計算への適用性を検討した。また、提案されたネスティング計算法を使って、浸水深と浸水流況から洪水リスクを評価した。

本研究で試みた三つのネスティング計算法のうち、参照計算と近い結果を示したのは水位を使ったネスティング計算法であった。また、蒸発散・浸透の考慮においても、問題なく計算結果を出力できることを示した。しかし、本研究で対象とした地域は比較的緩い勾配であったため、急な勾配を持つ地域で適用した場合の検討が必要である。また、異なる格子幅を用いた場合での浸水の広がりや異なったため、格子幅に応じた底面粗度の検討が必要である。

洪水氾濫リスク評価について、上記で提案されたネスティング計算によって、より詳細な浸水情報が得られ、住宅地における浸水リスク評価を行うことができた。また、詳細な流況を把握することにより、ボートによる避難における危険な場所の情報提供が可能になった。今後の課題は、現地調査を通して、住民の生活様式や避難方法、現状の防災対策を確認し、想定し得るリスクをリストアップすることである。

### 謝辞

本研究は地球規模課題対応国際科学技術協力事業 (SATREPS) (代表研究者: 中川一) の支援を受けました。また、バングラデシュでの現地調査ではバングラデシュ工科大学の Munsur Rahman 教授にご協力をいただきました。記して謝意を表します。

### 参考文献

佐藤慶太・二瓶泰雄 (2005): 河川洪水流シミュレーションに対するネスティング計算法の適用, 水工学論文集, Vol.49, pp.679-684.

武田誠・松尾直規・Parameshor Pokharel (2009): h-VA 氾濫解析法を用いたネスティングモデルに関する検討, 水工学論文集, Vol.53, pp.835-840.

田中智大・立川康人・萬和明 (2014): 分布型流出モデルをネスティングする流出・氾濫一体型モデルの構築, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.1495-1500.

二瓶泰雄・灘岡和夫・熊野良子 (2000): 新たなデータ同化手法に基づく開放性沿岸域のネスティング手法の提案, 海岸工学論文集, Vol.47, pp.461-465.

二瓶泰雄・町田佳隆・佐藤慶太・西村司・灘岡和夫 (2002): 新しい two-way ネスティング手法の開発, 海岸工学論文集, Vol.49, pp.421-425.

二瓶泰雄・佐藤慶太・青木康哲・西村司・灘岡和夫 (2002): ネスティング計算法を用いた吹通河マングローブ水域における高解像度流動シミュレーション, 海岸工学論文集, Vol.49, pp.416-420.

二瓶泰雄・佐藤慶太・灘岡和夫・熊野良子・西村司 (2003): 沿岸海水流動シミュレーションに対する新しい多重ネスティング計算法の開発, 土木学会論文集, Vol.740/II-64, pp.171-183.

橋本雅和・川池健司・中川一・張浩 (2015): ドライベッドを伴う洪水氾濫シミュレーションにおけるネスティング計算法の適用, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.4II, pp.1459-1464.

Ashworth P. J., Best J. L., Roden J. E., Bristow C. S. and Klaassen G. J. (2000): Morphological evolution and dynamics of a large, sand braid-bar, Jamuna River, Bangladesh, *Sedimentology*, Vol. 47, No. 3, pp. 533-555.

Best J. L., Ashworth P. J., Bristow C. S. and Roden J. (2003): Three-dimensional sedimentary architecture of a large, mid-channel sand braid bar, *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 73, No.4, pp.516-530.

Islam A. S., Bala S. K. and Haque M. A. (2010): Flood inundation map of Bangladesh using MODIS time-series images, *Journal of Flood Risk Management*, Vol.3, No.3, pp.210-222.

Laurent Debreu, Eric Blayo (2008): Two-way embedding algorithms: a review, *Ocean Dynamics*, Vol.58, No.5-6, pp.415-428.

Nakagawa H., Zhang H., Baba Y., Kawaike K., and Teraguchi H (2013): Hydraulic characteristics of typical bank-protection works along the Brahmaputra/Jamuna River, Bangladesh, *Journal of Flood Risk Management*, Vol.6, No.4, pp.345-359.

Paul B. K. (1984): Perception of and agricultural adjustment to floods in Jamuna floodplain, *Human ecology*, Vol.12, No.1, pp.3-19.

Thornthwaite C. W. (1948): An approach toward a rational classification of climate, *Geographical Review*, Vol.38, No.1, pp.55-94.

(論文受理日: 2015年6月11日)