

## (20) 破堤氾濫解析へのiRIC活用事例について

濱木 道大<sup>1</sup>・山内 孝昭<sup>2</sup>・井上 卓也<sup>3</sup>・清水 康行<sup>4</sup>・岩崎 理樹<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 開発工営社 水工事業本部水工第1部 (〒060-0004 札幌市中央区北4条西5丁目1番地13階)  
E-mail:hamaki@kai-koei.co.jp

<sup>3</sup>正会員 (独)寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒1062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

<sup>4</sup>正会員 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-0808 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>5</sup>正会員 Department of Civil Engineering, University of Illinois Urbana-Champaign

現在、水防法改正や洪水ハザードマップ作成の手引きの改定を受け、浸水想定区域図作成マニュアル(以下、新マニュアル)の改訂が行われ、道路空間や建物による障害・拡散等の空間特性を考慮するとともに、LP測量によるDEMデータ等を活用し微地形の効果を考慮するなどの氾濫解析の高度化が求められている。

本論文では、iRICプロジェクトから無料公開されている氾濫解析ソフトiRIC (Nays2Dflood)を基に、新マニュアルに対応した改良を行い、メッシュサイズの違いによる感度分析結果について報告するものである。今後は、中小河川や発展途上国等の氾濫解析において、iRICのより一層の活用が期待される。

**Key Words :** iRIC Project, numerical simulation, Levee breach, DEM, laser profiler, Hazard Map

### 1. はじめに

近年、集中豪雨等による水害が頻発しており、低平地に資産が集中する日本では、ひとたび破堤氾濫が発生すると甚大な被害が発生する。このため、あらかじめ浸水範囲を精度よく予測し、出水時の的確な避難行動や効率的な被害軽減対策等のより実践的な危機管理対策を立案しておくことが非常に重要である。

想定される破堤氾濫解析結果を重ね合わせた浸水想定区域図は、危機管理対策検討の基礎資料として非常に有用であるが、従来の氾濫解析<sup>1)</sup>は、地盤データの制約や計算時間の制約等の関係から、概ね250mの計算メッシュを基本として検討されて来た。

現在、水防法改正や洪水ハザードマップ作成の手引きの改定<sup>2)</sup>を受け、浸水想定区域図作成マニュアル<sup>3)</sup>(以下、新マニュアル)の改訂も行われており、概ね25m程度以下の計算メッシュを基本とし、道路空間や建物による障害・拡散等の空間特性を考慮するとともに、微地形の効果を考慮するなどの氾濫解析の高度化が求められている。これは、全国的にLP測量により流域のDEM (Digital Elevation Model) データが整備されてきたことや計算機の性能向上に伴い、技術的に氾濫計算の高度化が可能となっているためでもあり、特に建物が密集する都市域での氾濫解析において精度向上<sup>4)</sup>が期待できる。

本論文では、iRICプロジェクト<sup>5)</sup>から無料公開されて

いる氾濫解析ソフトiRIC-Nays2Dfloodを基に、新マニュアルに対応した改良(①建物占有率の考慮、②破堤地点の考慮による河道と氾濫原の一体となった氾濫解析モデル構築)を行い、メッシュサイズの違いによる感度分析結果について報告するものである。

### 2. iRICソルバーの改良

#### (1) iRICの概要

iRICはiRICプロジェクトから公開されている河川の流れ・河床変動解析ソフトウェアであり、国内外の多くの研究者から提供された解析ソルバーを使用できるだけでなく、計算格子作成や計算条件設定、解析結果の可視化などを統合したフリーソフトウェアである。iRICを用いることで、研究者や河川技術者は、計算格子作成などにかかる労力が軽減され、治水上の課題(水位上昇や局所洗掘)や、環境上の課題(植生繁茂、水質悪化)などの課題解決のための検討に注力できるようになっている。

また、フリーソフトであることから、世界中の国々で普及が進んでおり、特に洪水氾濫解析の必要性が高い東南アジア諸国での洪水対策などでも活用されている。

#### (2) 基礎式の修正

iRICに含まれている氾濫解析ソルバーNays2Dfloodに使

用されている2次元流れの基礎式<sup>6)</sup>を修正し、新マニュアルに対応するため建物占有率を考慮する係数 $\gamma$ を追加した。修正した基礎式は、(x, y)を直交座標として以下のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x hu)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y huv)}{\partial y} = \\ -\gamma_v hg \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + hR_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x huv)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y hv^2)}{\partial y} = \\ -\gamma_v hg \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + hR_y \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、

$$\frac{\tau_x}{\rho} = C_f u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \frac{\tau_y}{\rho} = C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

$$hR_x = \frac{h}{2} C_d' (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

$$hR_y = \frac{h}{2} C_d' (1 - \gamma_y) v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

$$C_f = \frac{g \gamma_v n_m^2}{h^{1/3}} \quad (7)$$

ここで、 $h$ は水深、 $t$ は時間、 $u$ は $x$ 方向の流速、 $v$ は $y$ 方向の流速、 $g$ は重力加速度、 $H$ は水位、 $\tau_x$ は $x$ 方向の河床せん断力、 $\tau_y$ は $y$ 方向の河床せん断力、 $C_f$ は河床せん断係数、 $\rho$ は水の密度、 $n_m$ はマンニングの粗度係数、 $C_d'$ は抗力係数÷建物の代表長さである。

$\gamma_v$ はメッシュの平均空隙率(1-建物占有率)、 $\gamma_x \cdot \gamma_y$ は $x$ 、 $y$ 方向透過率(メッシュ境界における平均空隙率)で次式のように表され、特に建物がモザイク状でランダムに配置する場合は、式(10)のように設定する。

$$\gamma_v = 1 - (S1 + S2 + S3) / (DX \times DY) \quad (8)$$

$$\gamma_x = 1 - B_x / DX, \quad \gamma_y = 1 - B_y / DY \quad (9)$$

$$\gamma_x = \gamma_y = \gamma_v \quad (10)$$

ここで、 $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$ はセル内の建物面積、 $DX$ 、 $DY$ はセル境界の距離であり、 $B_x$ 、 $B_y$ は図-1で表される。

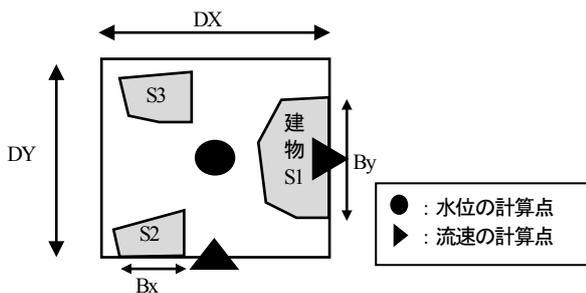


図-1 メッシュ内の建物と空隙率・透過率の設定

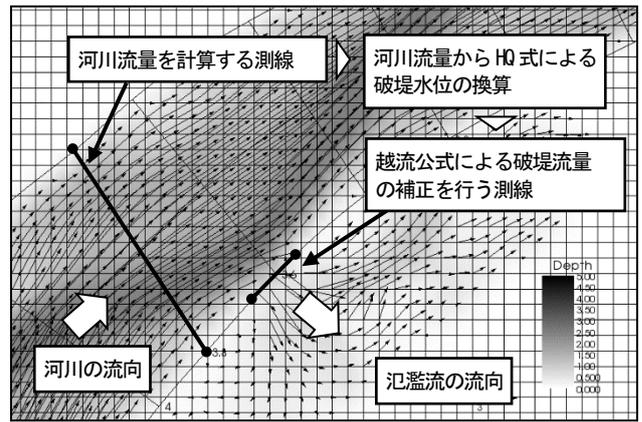


図-2 破堤箇所における氾濫流量の補正イメージ

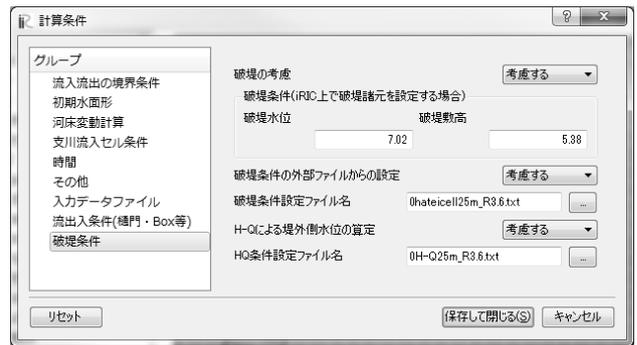


図-3 iRICによる計算条件の設定画面例

## (2) 氾濫流量の算出方法

通常の氾濫解析は、破堤による氾濫流量を横越流公式により算出することを基本とし、1次元不定流計算による河道内水位と堤内敷高等から氾濫流量を算出するのが一般的である。一方、Nays2Dfloodでは、河道と氾濫原の一体となった氾濫解析(平面2次元解析)を行うため、破堤箇所の計算メッシュの形状と、基礎方程式に基づく解析結果により氾濫流量が決定される。

このため、計算メッシュサイズに依存して氾濫流量に差異が発生し、メッシュサイズを変更した感度分析時に氾濫流量の整合が図れなくなる可能性がある。そこで、図-2のように河川流量からHQ式にて破堤水位の換算を行い、越流公式による氾濫流量の補正を逐次行うことで、氾濫流量の整合を図った。

## (3) その他の計算条件の設定方法

その他、樋門やボックスカルバートによる排水等によるメッシュ間の流出入を考慮した修正を行い、図-3のようにiRIC上で計算条件を変更できるように修正した。

## 3. GISとの連携

iRICには、計算メッシュを作成する機能も充実しており、通常は河川測量データやDEMデータから、氾濫原

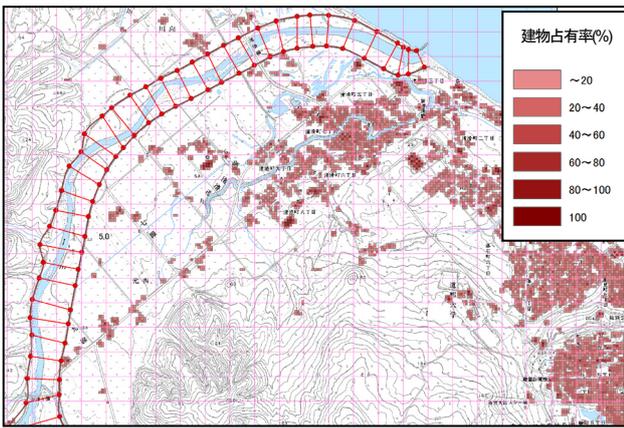


図-4 計算メッシュ (25m) の建物占有率コンター図

の地形を考慮した計算メッシュを作成することができる。ただし、今回はメッシュサイズによる不整合を排除するため、GISソフトの機能を活用して、図-4のように建物占有率等の地理情報データを各メッシュサイズ毎に作成し、別途RICに読み込んで解析を実行した。

#### 4. 感度分析

##### (1) 感度分析の目的

浸水想定区域図の作成には、想定される外力（洪水）に対し、破堤の可能性のある全ての地点において破堤氾濫解析を実施し、最大浸水深を包絡する浸水範囲を設定する必要がある。そのため、対象河川につき数十ケースの破堤氾濫解析を実施し、解析結果を重ね合わせる必要がある。精度向上だけに注力して計算メッシュの細分化を行うと、計算時間やデータ容量が膨大となり、非効率となる。そこで、対象氾濫原の一部をモデル地区として、メッシュサイズの違いによる解析結果や解析時間の差を比較することで、十分な解析精度を保ちつつ、現実的な計算時間で解析が可能となる最適メッシュサイズについて感度分析を行った。

表-1 感度分析結果一覧表

項目	設定条件		
解析範囲	モデル地区 約6km <sup>2</sup>		
解析対象時間	100時間		
破堤地点	KP3.6右岸（流下型）		
破堤流量	ピーク320m <sup>3</sup> /s程度		
メッシュサイズ(m)	5	10	25
メッシュサイズ比dx	0.2	0.4	1.0
メッシュ数	120,000	60,000	9,600
解析時間間隔dt(s)	0.2	0.4	1.0
実計算時間(h)	39.5	7.7	0.3
実計算時間比率	131.7	25.6	1.0
1/dx <sup>3</sup> (理論値)	125.0	15.6	1.0

※計算時間はWin7, CPU(Xeon E5-1650), 並列化なしの値であり、HDDへの書き込み速度によってもが変化する可能性がある

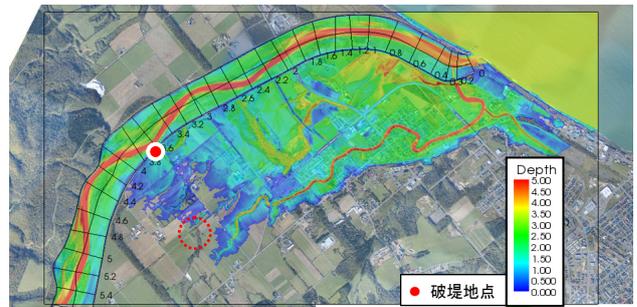


図-5 最大浸水深コンター図 (5mメッシュ)

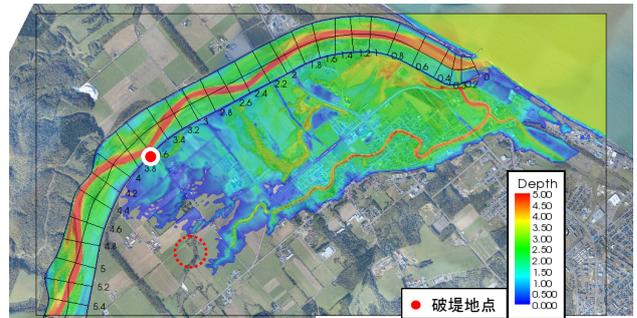


図-6 最大浸水深コンター図 (10mメッシュ)

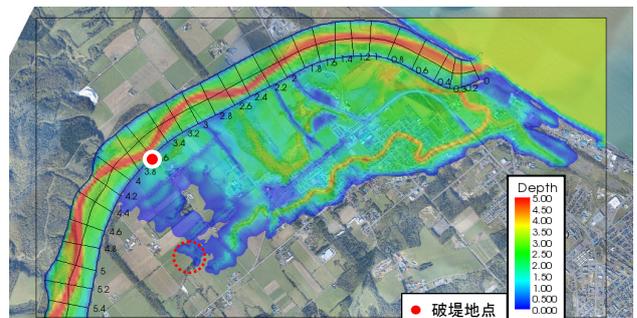


図-7 最大浸水深コンター図 (25mメッシュ)

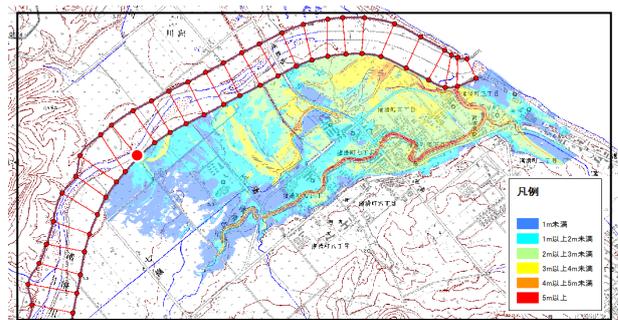


図-8 細分化表示した最大浸水深コンター図 (5mメッシュ)

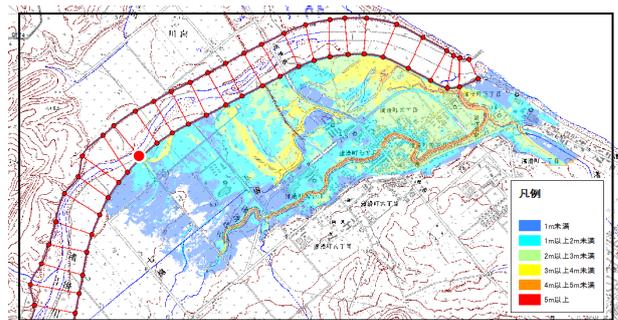


図-9 細分化表示した最大浸水深コンター図 (25mメッシュ)

## (2) 感度分析の結果

図- 5～図- 7は、各計算メッシュ毎の最大浸水深コンター図をiRICで表示したものである。これらによると、5m、10mメッシュでは上流部(赤丸範囲)で微地形を乗り越えずに止まっていた氾濫流が、25mメッシュでは微地形の高低差が平均化されたことにより乗り越えて浸水しており、微地形の表現力では、メッシュサイズが小さいほど有利な結果となった。

ただし、メッシュサイズの違いによる浸水域全体の範囲や浸水深に大きな違いは見られず、浸水位の計算結果から5mメッシュの地盤高を差し引いて、浸水範囲を細分表示した図- 8、図- 9によると、モデル地区では25mメッシュでも十分な精度を持っていることを確認した。

また、メッシュサイズと建物占有率の関係については、メッシュサイズを小さくしたほうが、道路空間等を氾濫水が流下し氾濫到達範囲が広がることが予想されたが、今回のモデル地区では破堤地点から市街地が離れており、河口部で地形勾配が緩く流速が遅かったこともあり、優位な差は確認できなかった。

表- 1は計算時間一覧表である。これによると、実計算時間が25mメッシュでは0.3時間であったのに対し、5mメッシュでは、40時間程度と計算時間が130倍となっている。メッシュサイズ比を1/5にしたことから、理論的には125倍の計算時間となることが予想され、HDDへの書き込みによる遅延分等があるものの、ほぼ理論値どおりの結果となった。氾濫原全域の計算を行う場合、さらに解析範囲が広がることから、解析に長時間を要し、5mメッシュでは非効率で現実的ではない。

なお、ソルバーの並列化により計算速度の向上が期待できるものの、並列化効率には計算機の性能や内部処理の効率化にも左右され、単純に並列化スレッド数を増やしても、逆に全体の高速化効率が下がる場合もある。このため、使用する計算機の性能や全体の総計算メッシュ数、計算ケース数等に合わせて最適な並列化スレッド数についても、適宜検討する必要がある。

## 5. まとめ

### (1) 得られた成果

本論文で得られた成果を、以下に列記する。

#### a) iRIC (Nays2Dflood) の改良

氾濫解析ソフトiRIC-Nays2Dfloodを基に、①建物占有率の考慮、②破堤地点の考慮による河道と氾濫原の一体となった氾濫解析モデル構築を行い、新マニュアルに対応した破堤氾濫解析を可能とした。

#### b) 感度分析 (最大浸水深)

微地形や建物障害の表現力では、メッシュサイズが小

さいほど有利な結果となったが、同じ破堤量ならば最大浸水深はほぼ同一の解析結果となることを確認した。

#### c) 感度分析 (計算時間)

実計算時間はほぼメッシュサイズ比の3乗に比例することから、効率性を考慮して計算メッシュサイズを検討する必要がある。今回の感度分析では、25m程度のメッシュサイズであれば、十分な精度を持った解析を効率よく行えることを確認した。

### (1) 今後の課題・展望

本論文の成果の一部は、公開版iRIC (Nays2Dflood ver5.0) に反映され、HPからダウンロード可能である。ただし、破堤地点の設定やiRICのGUI上での建物占有率の設定などは実装されていないため、今後のさらなる改良が必要である。

iRICはフリーソフトであることだけでなく、DEMデータだけからでも計算メッシュを作成し、氾濫計算を実施することができるため、河道データが未整備な中小河川や発展途上国における破堤氾濫の解析において、強力なツールとなることが期待される。

また、iRICのアニメーション表示機能を活用し、流域の氾濫形態の理解度の向上や、住民への防災教育等で視覚的にわかりやすい資料作りにも有効なツールとなることが期待される。

**謝辞：**本論文の作成にあたって、北海道開発局網走開発建設部にデータの提供をしていただいた。ここに記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 栗城稔, 末次忠司, 海野仁, 田中義人, 小林裕明: 氾濫シミュレーション・マニュアル(案), 土研資料第 3400号, 1996
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室: 洪水ハザードマップ作成の手引き (改訂版), 2013.
- 3) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室, 国土技術制作総合研究所 危機管理技術研究センター 水害研究室: 浸水想定区域図作成マニュアル, 2014.
- 4) 三浦心, 川村育男, 木村一郎, 三浦敦禎: 扇状地に発達した密集市街地における氾濫解析手法に関する検討, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.S\_979-S\_984,2010
- 5) <http://i-ric.org/ja/>
- 6) 清水康行: 河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について, 水工学論文集, 第 47 巻, pp643-648,2003
- 7) 清水康行, 鈴木英一, 川村里実, 井上卓也, 岩崎理樹, 濱木道大, 吉田智彦: *iRIC Software Nays2D Flood Solver Manual & Nays2D Flood Examples*, 2014.