

# h-VA氾濫解析法を用いた ネ스팅モデルに関する検討

STUDY ON NESTING MODEL BY USING  
H-VA INUNDATION ANALYSIS METHOD

武田 誠<sup>1</sup>・松尾直規<sup>2</sup>・ポカレル パラメソル<sup>3</sup>  
Makoto TAKEDA, Naoki MATSUO and Parameshor POKHAREL

<sup>1</sup>正会員 博士(工) 中部大学准教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

<sup>2</sup>フェロー 工学博士 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

<sup>3</sup>学生会員 中部大学大学院研究生 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

Though inundation analysis methods are widely used and have presented effective information in examination of measures for water disaster, further improvements in precision and the effectiveness of analysis are desired. Recently, the detailed ground elevation data are obtained by development of the survey technology. However, as the usual analysis method treats average ground elevation and average water depth in analysis grid, the detailed ground level data are not used effectively. The h-VA inundation analysis method has been proposed and examined by using various analysis conditions in our study as new analysis method in which the characteristics of ground elevation in analysis grid is considered in inundation analysis. In this study, the nesting model with h-VA inundation analysis method is developed and the validity and the effectiveness of this model are examined by using numerical simulation. From this study, especially, it is found that the nesting model which the fine grid is set to the area around dike break and the coarse grid is set to other area indicates good results.

**Key Words :** *Inundation analysis method, Nesting model, Ground level, Numerical analysis*

## 1. はじめに

氾濫解析法は水災対策を検討するツールとして重要な役割を有する。詳細な氾濫状況を再現するためには、道路や排水路、下水道システムなどを表現する必要があり、精緻な氾濫解析モデルが構築される<sup>1)</sup>が、その精緻さゆえに計算容量、計算時間が多大となっている。現状では、氾濫解析に用いられる格子スケールは50m～数100mのものが一般的であり<sup>2)</sup>、道路網などの詳細な表現は難しく、さらに細かい分解能が望まれるが、特に計算時間の観点から格子スケールを小さく取れないのが実情であろう。

一方で、今日では、高度に進歩したレーザープロファイラーなどの測量技術により、平面方向2.5m毎に0.15mの精度を持つ地盤高データが整備されるようになってきた<sup>3)</sup>。このような地盤高データを氾濫解析に取り入れている例も見られ、精度の向上が図られているものの、多くの場合は、50m～100mの幅を持った格子において、その平均地盤高を求めるために使用されており、詳細な地盤高データが十分に生かされていない状況にある。詳細な地盤高を直接解析に用いることも考えられるが、そ

うすると格子幅が数mとなり、計算時間が甚大となる。

氾濫解析の技術的展開と地盤高データの整備状況の関係を概観してみよう。以前はコンピュータの性能も低く、解析に用いることが可能な地盤データの整備状況も低かったため、ポンドモデル<sup>4)</sup>などの簡易的な取り扱いで氾濫計算が行われてきた。その後、コンピュータの性能も高まり、氾濫域を格子で分割して平面2次元解析が実施できるまでになった。その場合、地図データを基にした離散的な標高値からの補間を行って格子の地盤高データを与えていた。現在では氾濫解析法の高度化・精緻化による計算負荷の増大もあり、コンピュータの性能向上以上に使用可能な詳細な標高データが整備されている。

格子幅を小さくするという視点ではなく、計算時間を多大とせず、効果的に詳細な地盤高情報を氾濫解析に適用するという視点からの解析法の検討はこれまで実施されてきていないと考える。著者らは新たな試みとして、h-VA氾濫解析法を提案し、検討している<sup>5)</sup>。h-VA氾濫解析法は、ポンドモデルと同様の概念を用い、それを数10m幅の格子を要する氾濫解析に適用していることに特徴がある。本研究では、格子内の地盤高特性を考慮でき

るh-VA汜濫解析法の特徴を生かし、これまであまり例がなかった、汜濫解析における異なる格子スケールを用いた接続モデル（ネスティングモデル）を開発し、その精度および利点について検討する。併せて、ここで検討するネスティングモデルと同様の性能を有する、有限要素法や非構造格子を用いたモデルの課題を明らかにする。

なお、計算時間の観点から言えば、小河川や下水道システムの解析を含めた総合的な検討が不可欠であるが、ここでは、地表面汜濫のみを取り上げて検討している。

## 2. h-VA汜濫解析法の概要

h-VA汜濫解析法では、以下の仮定を設ける。

- A)格子内に流入した水は格子内の地盤高の低い方へ瞬時に流れ、連続式の未知量は水深ではなく水量とする。
- B)運動方程式において、移流項、粘性項が大きく影響を与えず省略できると仮定し、流量を未知量とする。

ここで、A)の仮定は、格子を一つのポンドにみなしたことに対応している。また、汜濫水の流れの解析には、簡単化のため、圧力項（重力項）と底面摩擦項が大きな影響を与えるとみなし、移流項、粘性項を省略して用いた。

これら二つの仮定を考慮し、連続式の本来の意味である「入ってきた正味の流量は汜濫水の体積の時間変化に等しい」という式と、流量を未知量として取り扱った移流項、粘性項を無視した運動方程式を本解析モデルの基礎式とする。図-1の定義位置を意識して展開した、それぞれの式を以下に示す。

$$\frac{\partial V}{\partial t} = (Q_{x1} - Q_{x2}) + (Q_{y1} - Q_{y2}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = -gA_x \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 Q_x \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} = -gA_y \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 Q_y \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

ここで、 $V$  は格子内の水量、 $Q_x, Q_y$  はそれぞれ  $x, y$  方向の流量 ( $Q_x = uA_x, Q_y = vA_y$ )、 $A_x, A_y$  はそれぞれ  $Q_x, Q_y$  が定義されている箇所の  $x, y$  方向の流水断面積、 $H$  は水位である。解析法の詳細については、紙面の都合上、武田ら<sup>9)</sup>を参考にさせていただきたい。なお、本計算手法は、得られた格子内最大水深から水位を求め、格子内で水位が一定であると仮定して、地盤高を引くことにより、詳細な浸水深を求めることが出来る。

ここで、図-2にh-VA汜濫解析法の特徴を示す。黒色で示されたラインは従来の汜濫解析モデルの概念であり、赤色で示されたラインはh-VA汜濫解析モデルの概念である。格子スケールが非常に小さい場合（図中①）には、移流の効果は無視していることから、h-VA汜濫解析モデルは従来の汜濫解析モデルよりも精度が悪いものと考えられるが、格子スケールが大きく流れも比較的緩やかでh-VA汜濫解析法の仮定が成り立つようであれば（図

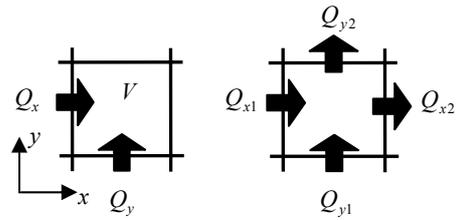


図-1 未知量の設定位置と(1)式の説明図

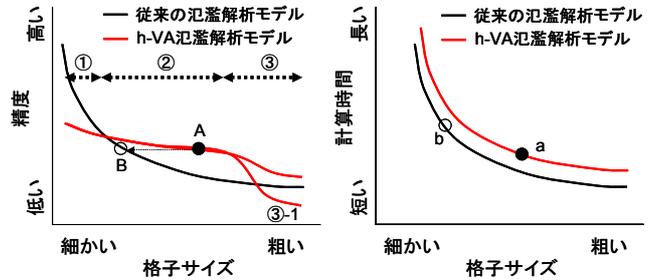


図-2 h-VA汜濫解析法の特徴

中②）、従来の汜濫解析モデルは平均水深×格子面積で汜濫水を表現していることから、格子内の地盤高形状を考慮しているh-VA汜濫解析モデルの精度は上がるものと考えられる。なお、格子がさらに大きくなり、格子内に複数の窪みが存在する場合には、解析精度が低下する可能性がある（図中③-1）。移流の効果が影響を与える格子スケールや流れの条件、採用できる最大の格子スケールなどの検討が必要ではあるが、武田らの検討結果<sup>9)</sup>から、数10m規模の格子スケールでは、概ね図中②の範囲にあると考えている。つぎに、計算時間をみてみれば、各格子におけるh-V関数、各辺におけるh-A関数を用いていることから、従来の汜濫解析モデルに比べると計算時間が多くなるが、例えば、図中Aの精度を有する格子スケールのh-VA汜濫解析モデルの計算時間（図中a）と同精度の従来の汜濫解析モデル（図中B）の計算時間（図中b）を比べれば、明らかにh-VA汜濫解析モデルは計算時間が短くなる。すなわち、ここで用いた仮定が成り立つ状況（図中②）では、工学的見地からh-VA汜濫解析モデルが有効である。

## 3. 汜濫解析におけるネスティングモデル

### (1) 汜濫解析におけるネスティングモデルの問題点

津波や高潮の解析では、外洋から沿岸域までを格子スケールの異なる領域で表現し、その領域間の物理量を受け渡して、解析を実施する接続モデル（ネスティングモデル）が用いられている<sup>6)</sup>。一方、汜濫解析では、有限要素法や非構造格子を用いた格子幅を任意に変化できるモデルは別として、矩形格子を接続させるネスティングモデルが開発されていない。

ここで、従来の汜濫解析法における格子接続の課題を

検討するため、接続を行う場合の断面の様子を図-3に示す。まず、大格子では、水量を格子面積×格子内の平均水深で表現していることから、図-3(a)に示すように氾濫水の挙動に大きな影響を与える水位を適切に表現できない。さらに、接続箇所において、水量を大格子から小格子へ受け渡す場合、何も条件を用いなければ、浸水が生じない図中のA格子へ水を受け渡すこととなる。仮に水位と地盤高を考慮して、水を受け渡さないとしても、大格子ではその場所で流出していることと見なしていることから取り扱いの不一致が生じる。一方、h-VA氾濫解析法では、格子内の地盤高を考慮した解析を行っていることから、水位が適切に求められる。さらに、接続箇所のA格子に水量を与えなくても、大格子における計算でもその場所では水が流れていないと考えているため矛盾が生じない。

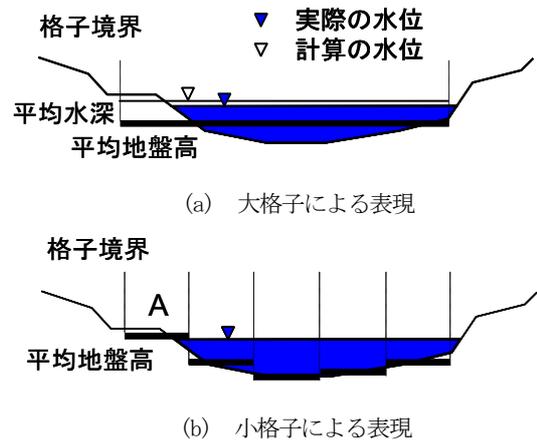


図-3 従来の氾濫解析におけるネスティングモデルの問題点

### (2) ネスティングモデルの概要

本研究では、大領域にh-VA氾濫解析法を適用し、小領域に従来の氾濫解析法（従来モデルとする）を適用し、その間を接続させるネスティングモデルを開発した。比較のために、両領域に従来モデルを適用した場合も同様に開発している。

ネスティングモデルの概要を図-4に示し、以下に接続1と接続2について説明する。

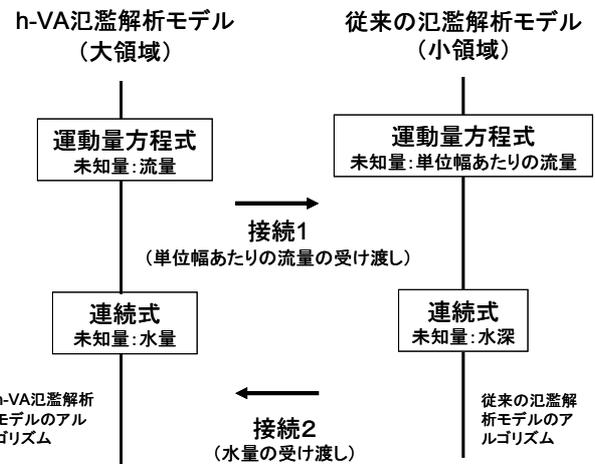


図-4 ネスティングモデルの概要

表-1 計算条件

	解析モデル		備考
CASE 1	従来モデル		格子幅 10m
CASE 2	h-VA氾濫解析法		格子幅 50m
	広領域(格子幅50m)	狭領域(格子幅10m)	
CASE 3	h-VA氾濫解析法	従来モデル	ネスティングモデル
CASE 4	従来モデル	従来モデル	ネスティングモデル

**接続1**：運動方程式を計算した後で、大領域から小領域へ単位幅流量を受け渡す。まず、大領域の流量受け渡し断面の水位と小領域の地盤高から水深を求める。大領域の流量を小領域の流量に配分する場合には、マニング則を用い、水深の5/3乗をその配分に用いた。得られた小領域の格子の流量を格子幅で割って単位幅流量を求めた。

**接続2**：連続式を計算した後で、小領域から大領域へ水量を受け渡す。大領域の格子内に存在する小領域の格子の水量を総和し、大領域の格子の水量とした。

両方の領域に従来モデルを適用した場合も、同様の接続法を用いている。大領域の単位幅流量に格子幅を掛けて流量を求め接続1を行い、大領域の格子内に存在する小領域の格子の水量を総和したものを大領域の格子面積で除することによって大領域の格子の水深を求めた。

本検討では、次の2つの取り扱いを行った。

**ケース A**：破堤箇所近くの領域は、氾濫水の流動が非常に激しく、詳細な水深、流速分布の解析が要求されることから、その地域を詳細な格子で表現し、破堤箇所から離れた場所では粗い格子で表現する。

**ケース B**：特に検討を要する領域を細かい格子で表現し、その周りは粗い格子で表現する。

### (3) 計算条件

計算条件を表-1に示す。本研究では、名古屋市内の下水道処理区の地盤勾配が緩やかな箇所を対象に、破堤の

条件を用いて検討した。5m毎の地盤高データを用い、10m×10m格子(平均地盤高、格子数：357個×550個)を用いた従来モデルと、ネスティングモデルとの比較を行う。ネスティングモデルは、広領域(50m×50m格子)と狭領域(10m×10m格子)を配置し、ケースAとケースBを考慮し、図-5に示す2タイプの領域設定を行っている。さらに、比較のために、広領域を対象としたh-VA氾濫解析モデルによる解析も実施している。なお、すべての領域を粗い格子で設定した従来モデルの場合は、格子スケールによる誤差が全領域において現れることが明白なため<sup>5)</sup>、この検討においては対象としていない。図-5に示した破堤箇所では図-6の流入流量を想定し、6時間後までを計算対象とした。なお、粗度係数の値として

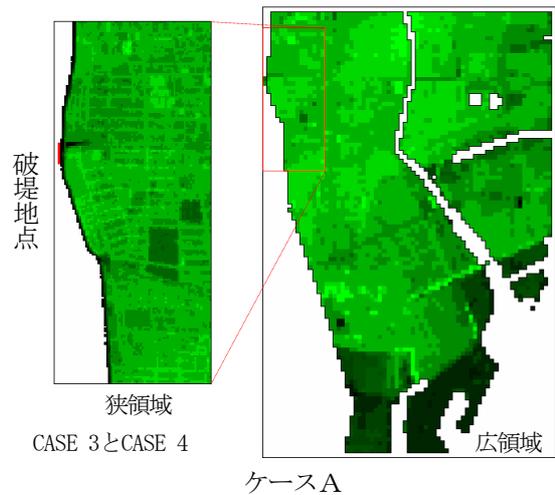
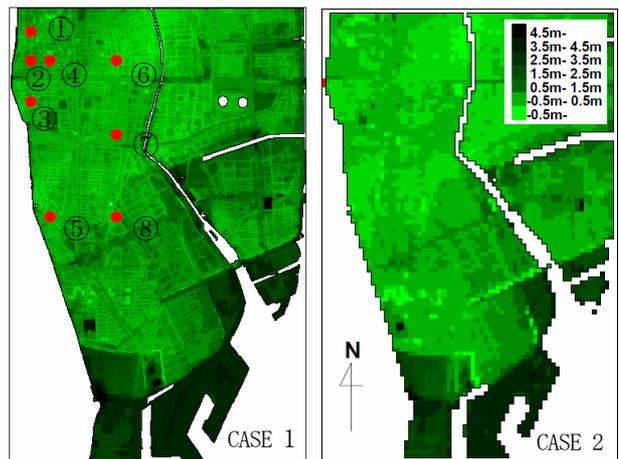
0.067を用いた。本研究では、格子スケールが全てにおいて小さいCASE 1の結果を真値とみなしている。

#### (4) 計算結果

##### a) ケースAの場合

最大浸水深の分布を図-7に示す。CASE 1の結果から、道路に沿った浸水の様子がみてとれる。CASE 2の結果からは、格子幅が50mであるが、h-VA氾濫解析法を用いていることから、詳細な浸水情報が得られていることが分かる。ただし、図中赤枠の北西部ではCASE 1よりも浸水深が小さく計算されている。CASE 3では、ほぼCASE 1と同様の最大浸水深が得られている。そして、CASE 4では、狭領域では詳細な浸水の様子が計算できているが、広領域では格子スケールが粗いために、当然ではあるがCASE 1よりも粗く計算が行われている。図-5のCASE 1図の赤丸で示した8地点における浸水深の時間変化を図-8に示す。破堤箇所近傍(①, ②)では、CASE 2の結果はその他の結果と比べて浸水が遅く現れており、浸水深のピークも小さくなっている。破堤箇所から離れた場所では、それぞれの結果に大きな差がなくなっているが、広領域において従来モデルを用いているCASE 4は、浸水深の差が現れている。一方、大きな格子幅を持つCASE 2では、h-VA氾濫解析法を用いていることから、CASE 1と同様の結果が得られている。CASE 3の結果がCASE 1の結果とほぼ同一であったことから、破堤箇所を詳細に取り扱ったネスティングモデルの妥当性が示された。なお、図-8を詳しく見てみれば、特に⑤と⑧では、CASE 1とCASE 3においても、浸水の時間的な始まりに両者の違いが現れている。大きな格子スケールの場合、流れに対する抵抗を十分に表現できていないことが考えられ、これは今後検討すべき課題であろう。

破堤箇所近傍の流れを詳細に検討するため、CASE 1とCASE 2における浸水深の時間的な広がり様子を図-9に示す。本図から、CASE 1では、図-7の北西部に向かう浸水がみられるのに対し、CASE 2ではそういった浸水の様子はみられず、30分以降に北西部に浸水が広がっていることが分かる。本計算では、同じ距離の破堤箇所において図-6の流量を与えている。CASE 1の場合には、破堤箇所の格子の地盤高が高くてもそこに流量を与えているが、CASE 2の場合には、h-VA氾濫解析法を適用していることから、格子内の低い箇所でも水が流れる。すなわち、解析法の特徴によって、境界条件として与える流量の位置が異なることとなり、高い地盤高を持つ格子に流量が与えられたCASE 1は早く北西部への浸水が始まり、一方、CASE 2は破堤箇所北部の線形構造物の影響で計算の初期に北西部へ広がらなかったと考えられる。CASE 3およびCASE 4は、破堤箇所近傍の狭領域に10m格子および従来モデルを用いていることから、CASE 1と同様の浸水域の時間変化を示した。なお、次のケースBも含めた全計算において、質量保存は保たれていた。



ケースA

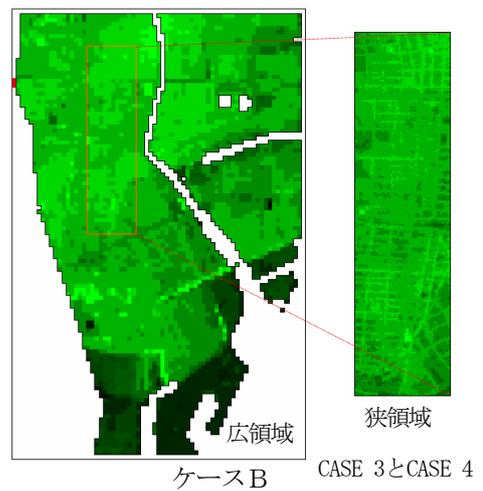


図-5 計算領域

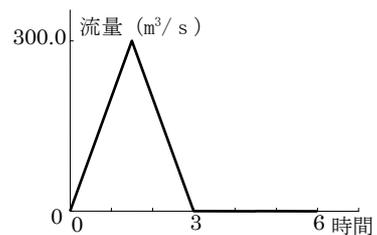


図-6 破堤箇所の流入流量

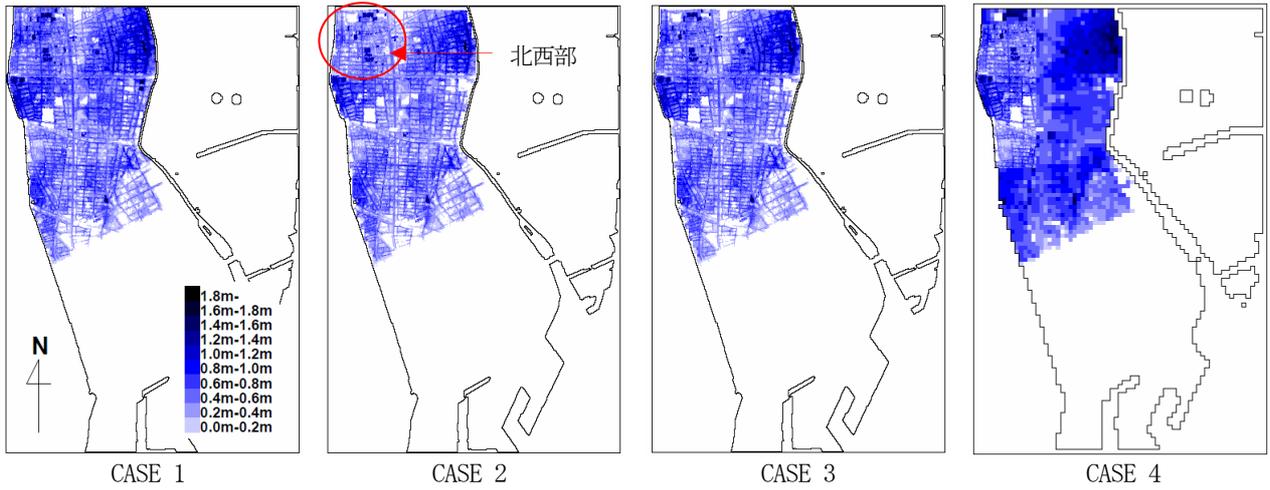


図-7 最大浸水深の分布（ケースAの場合）

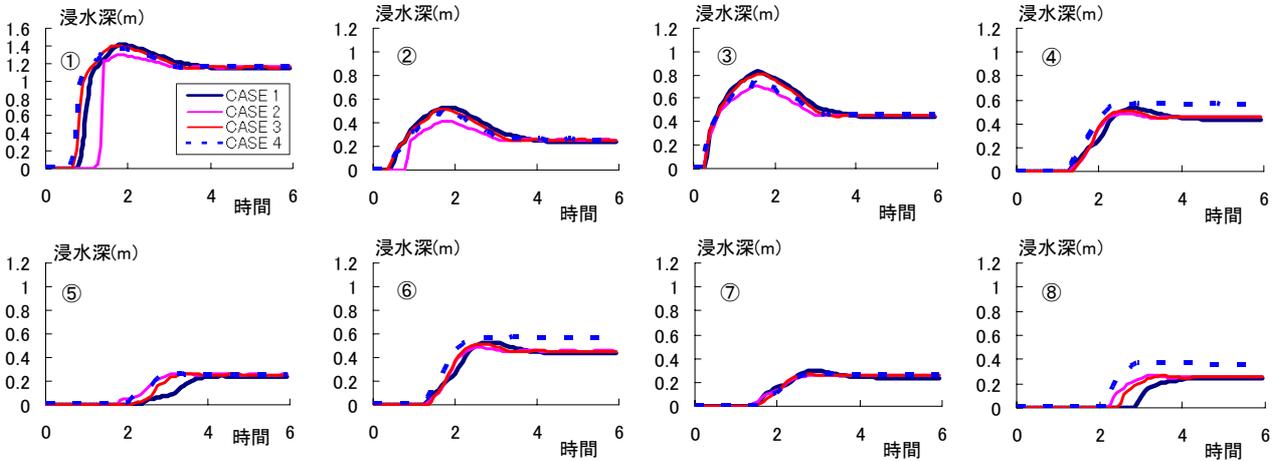


図-8 浸水深の時間変化（ケースAの場合）

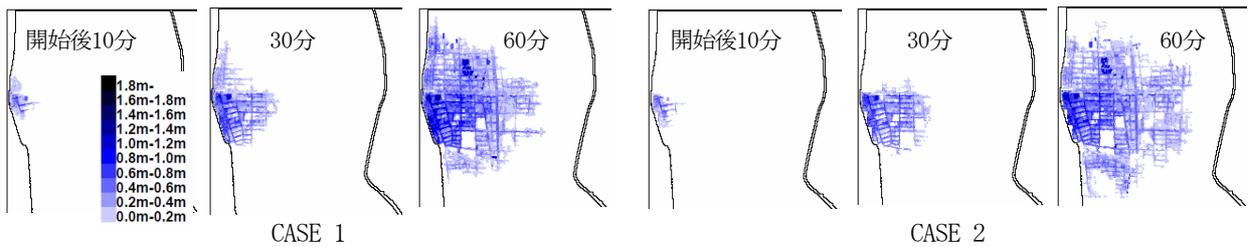


図-9 破堤箇所近傍の浸水深の広がり

b) ケースBの場合

図-5のCASE 1図の赤丸の8地点における浸水深の時間変化を図-10に示す。本図から、広領域において、CASE 4の結果とそれ以外の結果に差が現れているが、狭領域の地点（⑥、⑦、⑧）では、すべての解析結果に差が無いことが分かる。なお、CASE 2とCASE 3はほぼ同じ値を示している。本解析結果の場合、狭領域の解析結果にCASEによる差が生じなかった。このことは、従来モデルでネスティングを実行しても、緩やかな地盤勾配を有する本解析条件では、狭領域の解析に限れば妥当な結果を得ることを示すものであるが、図-11に示した最大浸

水深の分布からも分かるように、広領域の解析をみれば、その精度は十分では無く、h-VA氾濫解析法あるいはそのネスティングモデルを用いた方が妥当であろう。

狭領域を設定する一つの目的に、流速分布および流体力の評価がある。h-VA氾濫解析法は浸水深の評価に重点を置いたものであり、流速の表現にはあいまいさが残る。したがって、構造物に対する影響など、流速を含めた詳細な解析が要求され、かつ詳細な格子で全計算領域を解析するには膨大な計算時間が必要となる場合には、ここで示したネスティングモデルが有効であり、粗い格子で設定できる箇所はh-VA氾濫解析法で、細かい格子

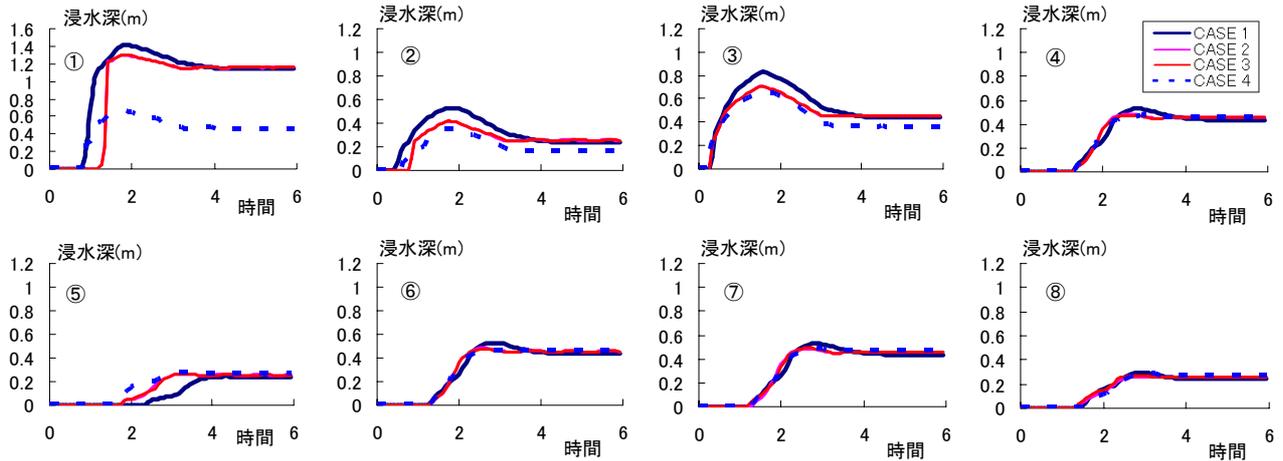


図-10 浸水深の時間変化 (ケースBの場合)

で設定する箇所は従来モデルあるいは更に高度なモデル<sup>7)</sup>を用いるなど、適宜モデルを組み合わせることも実務では有益な方法であると考えられる。参考までに、CASE 1とCASE 3の実計算時間は、3.5時間と0.6時間であった。

## 7. おわりに

本研究では、格子内の地盤高特性を考慮したh-VA氾濫解析法が水位を適切に表現できることを考慮し、氾濫解析におけるネスティングモデルを構築し、2つのケースにおいて、その妥当性および有用性を示した。得られた成果をまとめれば、次のとおりである。

- 1) 本報において、著者らが提案しているh-VA氾濫解析法の特徴および有効性をまとめた。
- 2) 氾濫解析法におけるネスティングモデルの問題点を示し、その観点からのh-VA氾濫解析法の有効性を示した。
- 3) 氾濫解析におけるネスティングモデルを開発した。CASE 1との比較から、ネスティングモデルの結果 (CASE 3とCASE 4) には矛盾が無く、開発したネスティングモデルの妥当性が示された。
- 4) 破堤箇所近傍には細かい格子を配置し従来モデルで解析し、それ以外は粗い格子を配置しh-VA氾濫解析法で解析するネスティングモデル(CASE 3)の計算結果が、すべての領域に細かい格子を配置した従来モデルの計算結果 (CASE 1) とほぼ一致したことから、ここで提案したネスティングモデルの妥当性が示された。ただし、両者には、場所において浸水開始時間のズレが現れた。
- 5) 計算時間の観点から困難であった詳細な格子を用いた氾濫解析も、h-VA氾濫解析法を用いたネスティングモデルを利用することにより、膨大な計算時間を要することなく、高精度で解析できるものと考えられる。

なお、有限要素法や非構造格子を用いた氾濫解析モデルに関して、用いる格子スケールが地形を表現できないくらいに大きい場合には、CASE 4で示された誤差が生じることが予想され、注意が必要である。

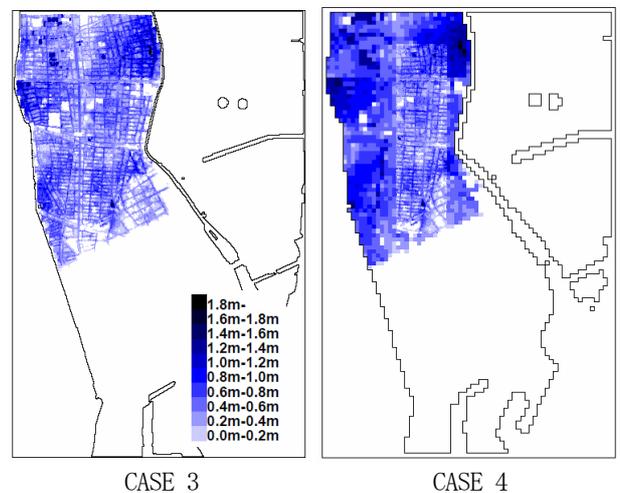


図-11 最大浸水深 (ケースBの場合)

## 参考文献

- 1) 例えば、川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 坂井広正, 相良亮輔: 低平地河川流域における内水氾濫解析法とその寝屋川流域への適用, 水工学論文集, 第46巻, pp.367-372, 2002.
- 2) 浸水想定区域図作成マニュアル: 国土交通省河川局治水課, 平成17年6月.
- 3) 館健一郎, 武富一秀, 川本一喜, 金本誠, 飯田進史, 平川丁治, 谷岡康: 内水を考慮した氾濫解析モデルの構築と検証—大垣市を対象として—, 河川技術論文集第8巻, 2002.
- 4) 土木学会編: 水理公式集, 平成11年版, p.128, 1999.
- 5) 武田誠, 小寺大輔, 松尾直規: 格子内の地盤高特性を考慮した簡便な氾濫解析法に関する研究, 水工学論文集, 第52巻, pp.853-858, 2008.
- 6) 後藤智明, 小川由信: Leap-Frog法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科資料, 1982.
- 7) 秋山壽一郎, 重枝未玲: 河道特性と市街地構造を考慮した越水・破堤氾濫シミュレーション, 水工学論文集, 第50巻, pp.691-696, 2006.

(2008. 9. 30受付)