

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

STUDY ON EFFECTIVE INUNDATION ANALYSIS METHOD CONSIDERING CHARACTERISTICS OF GROUND ELEVATION IN CALCULATION GRID

武田 誠¹・小寺大輔²・松尾直規³

Makoto TAKEDA, Daisuke KODERA and Naoki MATSUO

¹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)

²正会員 山田建設株式会社(497-0048 愛知県海部郡蟹江町舟入二丁目143番地)

³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)

Inundation analysis method has been used on measures for water disaster in many cities. In the inundation analysis method the various hard and soft measures are examined and applied to actual field. Recently, the detailed ground elevation data are obtained by development in 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 is not used effectively. In this study, the new inundation analysis method is developed and the validity of this analysis model is examined by comparison between analysis results by using normal analysis model and that by using new analysis model presented here. The new analysis model presented here treats inundation water volume as unknown value. Therefore, continuity equation becomes the equation related with water volume. Next, inundation water depth is obtained from prepared function of water depth and water volume. Finally, the momentum equation without advection term and viscosity term is analyzed by considering the characteristics of ground elevation.

Key Words : Inundation analysis method, Ground level, Numerical analysis

1. はじめに

近年, 様々な都市において水災が発生している. これまでの水災対策の主な対象としてきた外水氾濫に加えて, 内水氾濫による水災も目立ってきており, さまざまな水の事象を考慮しながら, 水災対策を講じることの重要性が指摘されてきている. このような水災対策を検討するにあたり, 氾濫解析法が広く使用されており, 数多くの水災対策の評価・検討に用いられ, 実績をあげている. しかし, 更なる精度向上および解析の簡便さについての検討も熱望されている. 本研究では, 簡便であり, かつ高精度な氾濫解析モデルを, 工学的見地から検討する.

ところで, 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¹⁾. 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. 一方で, このような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, 解析時間が多大となる. 実際の対策の検討には, 数多くの計算条件を設定し, 解析を行わなければならない. そのような検討の場合, 多大な計算時間は避けたいのが現状である. したがって, 工学的な観点からは, ある程度の格子 (たとえば, 10m~50m) で, ある程度の広い範囲を計算できる精度の良い氾濫解析法が望まれており, 付け加えるならば, レーザープロファイラーなどの詳細な地盤高データが効果的に反映できる解析法が望まれる.

現在広く普及している氾濫解析モデルは, 岩佐・井上・水鳥²⁾により研究されたものが端緒となっており, 浅水方程式に基づき構築されている. その後, 建物や道路などの都市構造物の表現や破堤に伴う激しい水理現象の表現など氾濫解析モデルの高度化が進められている³⁾. しかし, 土地情報を精度良く表現するためには, 解析格子を小さく採る必要があり, 上記の工学的要望を満たさない. そこで, 本研究では, 格子内の地盤高特性を考慮した氾濫解析法について検討する. なお, 提案するモデルはボンドモデルの特徴⁴⁾を有し, 解析に用いる数十m程

度の格子毎の水深と水量、格子の辺毎の水深と流水断面積の関係（地盤高特性）を用いることに特徴がある。

2. 氾濫解析法

(1) 従来の氾濫解析法（従来モデル）

ここでは、従来の氾濫解析法を示すとともに、その問題点を指摘する。現在、広く普及している氾濫解析法は、支配方程式として以下の浅水方程式が用いられている。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = & -gh \frac{\partial H}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = & -gh \frac{\partial H}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速、 h は水深、 M, N はそれぞれ x, y 方向のフラックス ($M = uh$, $N = vh$)、 H は水位、 τ_{bx}, τ_{by} はそれぞれ x, y 方向の底面のせん断応力、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ はそれぞれ x, y 方向の渦動粘性係数、 x, y は平面の座標、 t は時間である。また、底面のせん断応力は、マンニングの粗度係数を用いて、以下の式で表される。

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 M \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (4)$$

$$\tau_{by} = \rho g n^2 N \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (5)$$

さて、(1)式、(2)式、(3)式は、ある点における方程式であり、計算格子で積分する（有限体積法）か、微分を差分に置き換える（差分法）かの処理を行って、数値解析に用いている。この場合、(1)式の未知量として水深を用いていることから、格子内平均水深が得られ、解析に用いられる地盤高も格子内平均地盤高を使わざるを得ない。また、運動量方程式も格子の辺に定義された単位幅流量フラックスであり、これは格子の辺で一様に流れているという仮定が入っているが、氾濫現象の場合、そのように流れているとは限らない。

(2) 提案する氾濫解析法（h-VA氾濫解析モデル）

ここでは、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（体積）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。

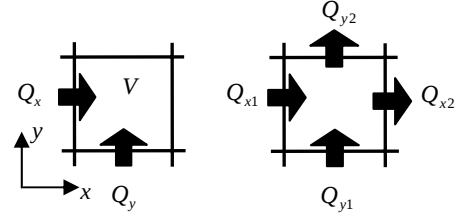


図-1 未知量の設定位置と(6)式の説明図

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、氾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。

これら二点の仮定を考慮し、連続式の本来の意味である「入ってきた正味の流量は氾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。それぞれの式を以下に示す。

$$\frac{\partial V}{\partial t} = (Q_{x1} - Q_{x2}) + (Q_{y1} - Q_{y2}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = -gA_x \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 Q_x \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} = -gA_y \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 Q_y \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (8)$$

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。なお、水位 H は、格子内最低地盤高 $z_{\min}$ とその場所の水深 h_m を用いて、以下の式で求まる。

$$H = h_m + z_{\min} \quad (9)$$

ここでの未知量 V は格子全体の値であり、 Q_x, Q_y は図-1に示すように辺の中央に設置した。また、水位 H は格子内で一様とみなし、 Q_x, Q_y が定義されている場所の水位を求める場合には、 H が格子中央に位置するとして、隣り合う格子から求めている。

つぎに、本解析の手順を説明する。解析を行う前に、それぞれの格子内に存在する詳細な地盤高データを用いて、格子内の最低地盤高を基準とした $h-V$ 曲線、断面内の最低地盤高を基準とした $h-A_x$ 曲線、 $h-A_y$ 曲線を作成する。

計算では、(6)式により、格子内の水量が求まり、 $h-V$ 曲線を用いて、その格子内水量に対応する水深（最低地盤高の水深）を求める。(9)式を用いて格子内水位を計算する。格子内水位から、 Q_x, Q_y 定義位置の水位を求め、最低地盤高を差し引くことで断面内の最大水深を求める。 $h-A_x$ 曲線、 $h-A_y$ 曲線を用いて、その水深に対応する流水断面積を求める。(7)式と(8)式により流量を求める。得られた値を既知の値に置き換えて、

(6)式の計算へと繰り返される。

3. 計算条件

5m毎の地盤高データ⁵⁾を用い、10m×10m格子(平均地盤高)を用いた従来の平面二次元氾濫解析法(以後、従来モデルとする)(CASE 1)、50m×50m格子(平均地盤高)を用いた従来モデル(CASE 2)、50m×50m格子(格子内最低地盤高)を用いたh-VA氾濫解析法(CASE 3)の比較を行う。

また、CASE 3ではC.V.内の地盤高の配置を流れの解析に少しでも反映させようと考え、 $h-A$ 曲線の取り扱いに関して以下の検討を行った。流量が定義されている断面の地盤高データを用いて $h-A$ 曲線を算出した場合をCASE 3a、コントロールボリューム(以下、C.V.とする)内の流れ方向(図2参照)の最高地盤高を用いて算出した場合をCASE 3b、C.V.内の流れ方向の平均地盤高を用いて算出した場合をCASE 3cとした。

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(格子数、CASE 1:357個×550個、CASE 2とCASE 3:71個×110個)と急な箇所(CASE 1:227個×490個、CASE 2とCASE 3:45個×98個)を対象に、破堤と降雨の条件を用いて検討した。破堤の条件では図-3の流入流量を想定し、降雨の条件では計算初期から時間雨量10mmの雨が3時間続くことを想定し、両方とも、6時間後までを計算対象とした。用いた計算領域および地盤高を図-4に示す。なお、粗度係数の値として0.067を用いた。本研究では、格子スケールが小さいCASE 1の結果を真値とみなし、格子を大きくした場合に如何にCASE 1の結果に近づくかという観点から考察した。

4. 地盤勾配が緩やかな場合

(1) 破堤の場合

図-5にCASE 1とCASE 2の最大浸水深の分布を示す。CASE 1の結果から、道路に沿った浸水の様子など、詳細な浸水状況が計算されていることが分かる。また、CASE 2の結果からは、CASE 1と同様の浸水の様子が得られているが、格子スケールが大きいため、道路に沿う流れなど、詳細な解析結果は得られていない。さらに、CASE 1よりも広い範囲に浸水が見られる。

つぎに、CASE 3の最大浸水深の分布を図-6に示す。本図は、格子内の最低地盤高における水深を表示していることから、CASE 1とCASE 2よりも大きな浸水の様子を示している。ここで、図-7のように水位が格子内において一定であると仮定し、水位から格子内の地盤高を引いてCASE 1に対応する場所の浸水深を算出し、図化したものが図-8である。本図から、CASE 3aとCASE 3cは、

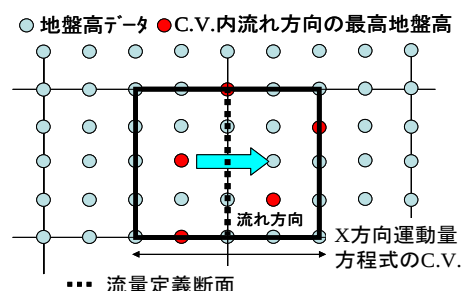


図-2 $h-A$ 曲線の取り扱い

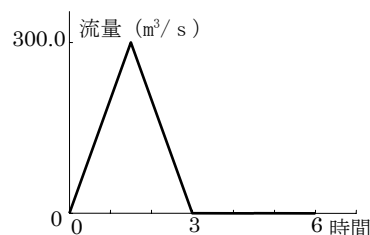
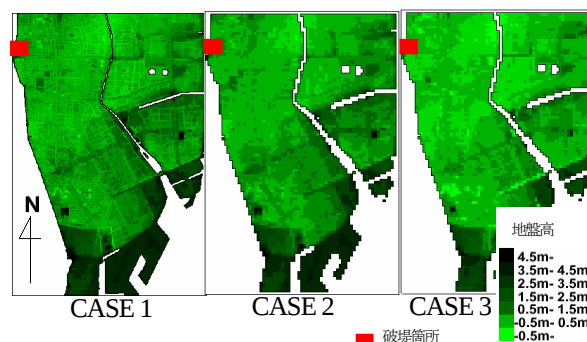
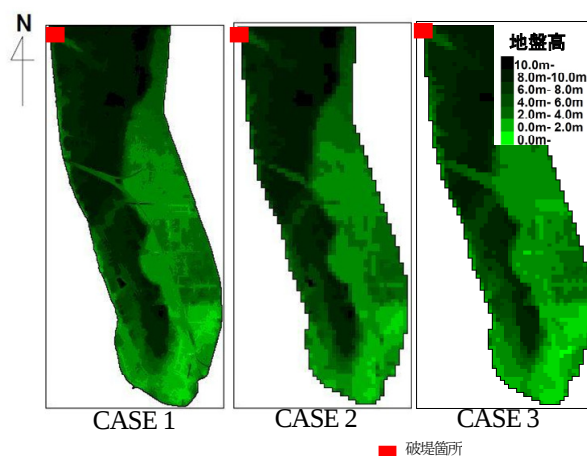


図-3 破堤箇所の流入流量



地盤勾配が緩やかな場合



地盤勾配が急な場合

図-4 地盤高

CASE 1と非常に良く似た浸水の様子が得られており、道路に沿った浸水深の分布など、十分な精度を有していることが分かる。また、CASE 3bはC.V.内の流れ方向の最高地盤高を用いて、 $h-A$ 曲線を算出したものであり、この場合、流れにくくなることから、CASE 1よりも浸

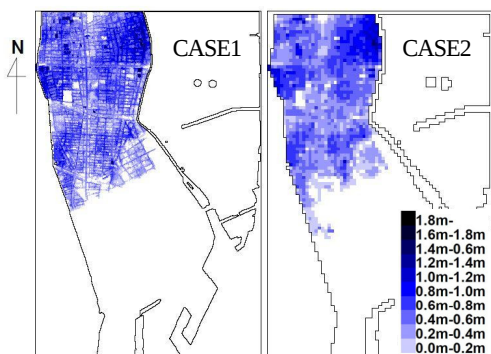


図-5 CASE 1とCASE 2の最大浸水深

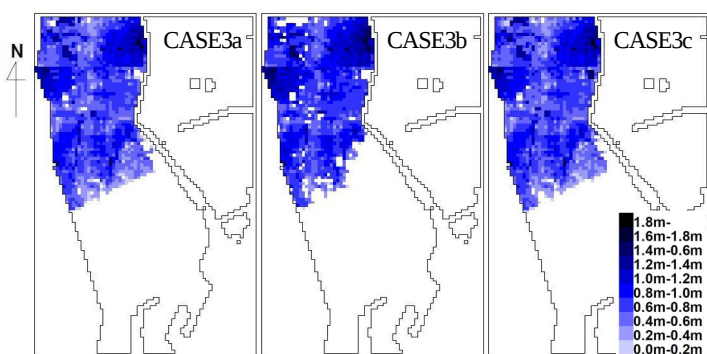


図-6 CASE 3の最大浸水深

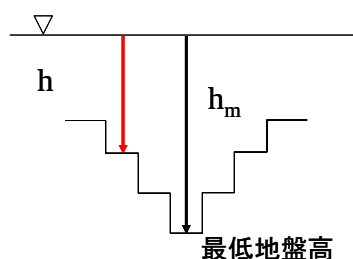


図-7 詳細な浸水深算出の概念図

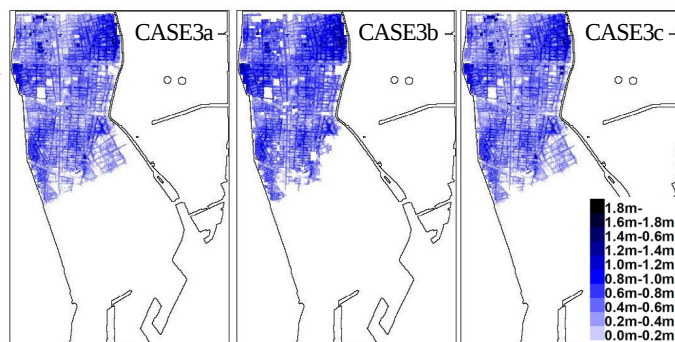


図-8 CASE 3の最大浸水深 (CASE 1の地盤高を考慮)

水の広がり狭くなっている。ここで、CASE 1に対するCASE 2およびCASE 3の一致度を詳細に検討するために、横軸にCASE 1における最大浸水深を、縦軸にそれぞれのCASE 1に対応する最大浸水深をとり、図化したものが、図-9である。本図から、CASE 3がCASE 1と非常に良く一致していることが分かる。

(2) 降雨の場合

つぎに、降雨を想定した場合の最大浸水深の分布を図-10に示す。本図からも、破堤の場合と同様に、CASE 1は道路に沿った浸水の様子がみられるのに対し、CASE 2は全体的な浸水の様子はCASE 1と同様であるが、格子スケールが大きいため道路に沿った浸水の様子が十分に現れていない。CASE 3aとCASE 3cは、道路に沿った浸水の様子など、CASE 1と同様な浸水状況となっている。ただし、CASE 3bは流れにくい特性から、CASE 3aとCASE 3cよりも浸水深が大きくなっている。

さらに、CASE 3は、CASE 1よりも浸水深の大きいところが広く分布していることが分かる。これは、格子内に降った雨は瞬時に地盤の低いところへ流れるためであり、h-VA氾濫解析法の特徴と考えられる。そこで、横軸にCASE 1における最大浸水深を、縦軸にそれぞれのCASE 1に対応する最大浸水深をとり、図化したものが、図-11である。本図から、CASE 2よりはCASE 3の方がCASE 1に一致する良い精度を有していることが分かる。ただし、CASE 1の浸水深が低い場所に差が現れており、図-9とは異なる結果となっている。したがって、h-VA氾濫解析法

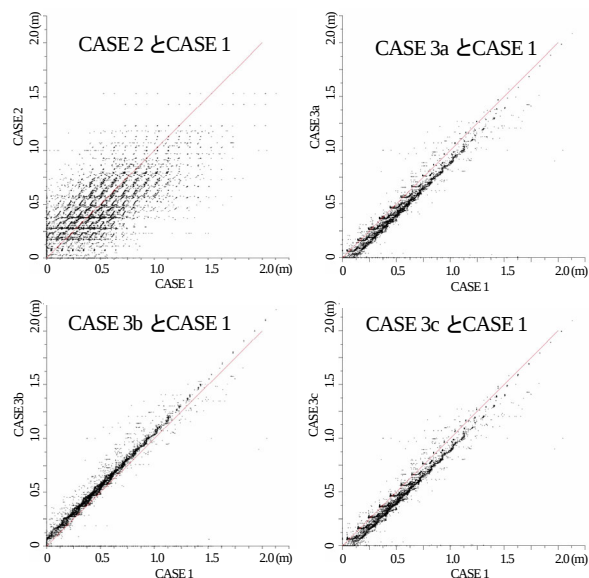


図-9 最大浸水深の比較

は、低い箇所にそって水が流れる破堤のような場合には、良好な精度を有しているが、降雨の場合は細かな格子を用いた場合との差が生じることが分かる。ただし、格子スケールを大きくした従来の氾濫解析法よりは、飛躍的に精度が向上することも示された。

これらの結果から、地盤勾配が緩やかな場合の破堤および降雨を対象とした解析における、h-VA氾濫解析法の妥当性が示されたといえる。

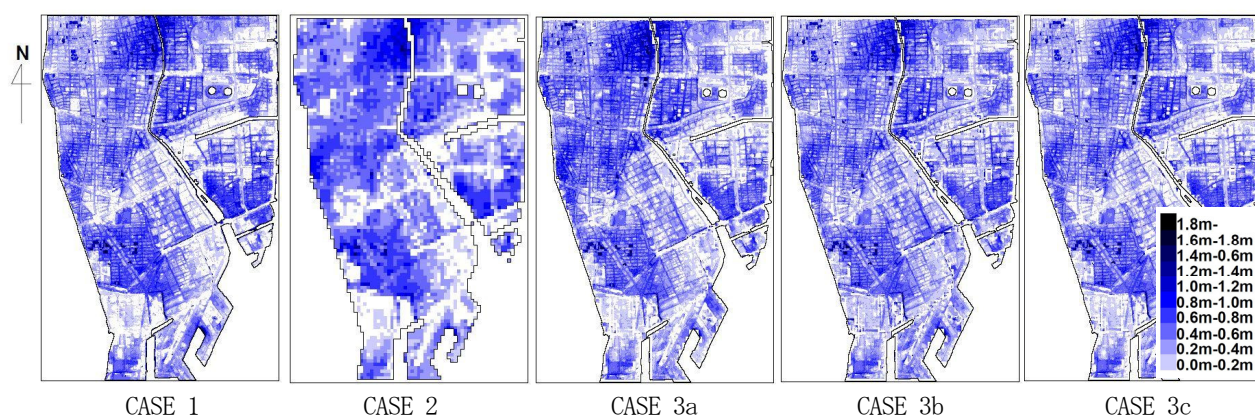


図-10 降雨の場合における最大浸水深

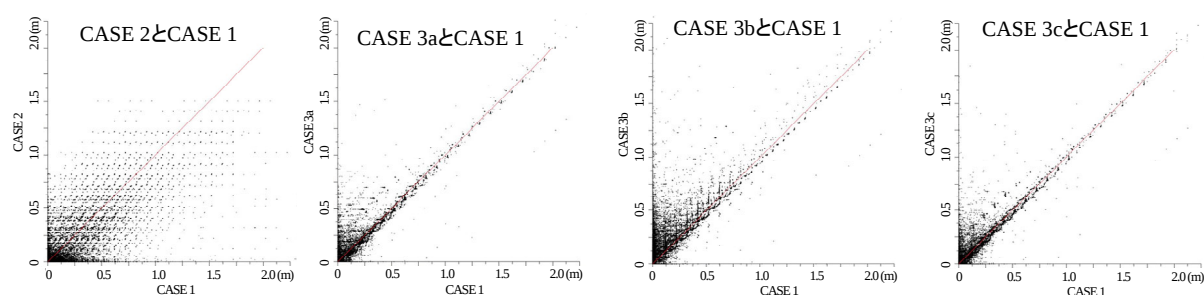


図-11 最大浸水深の比較

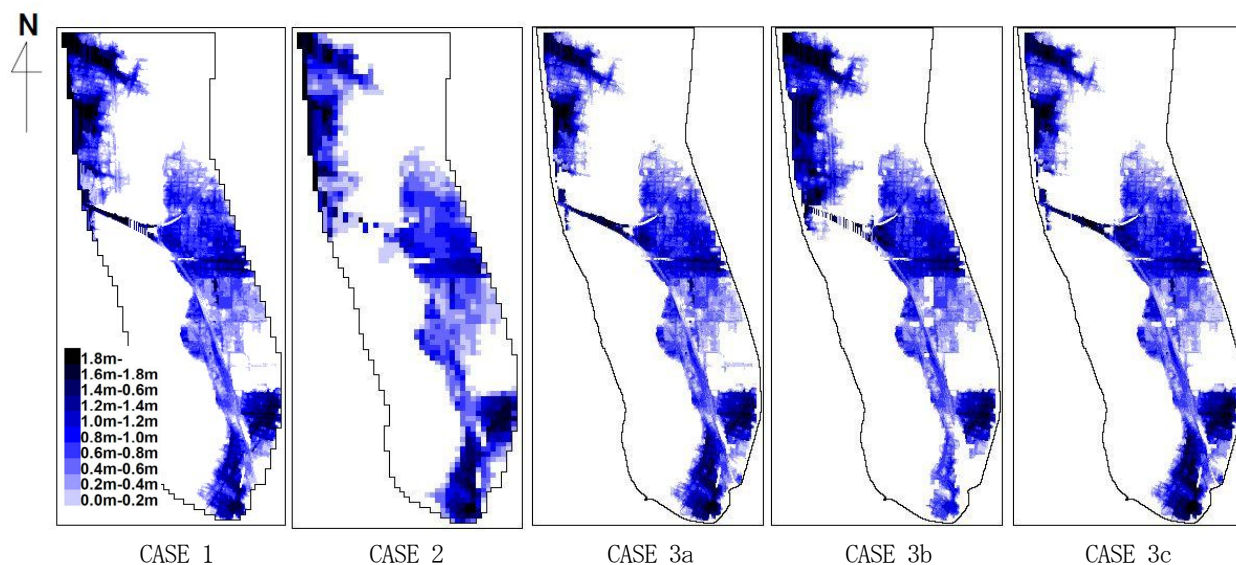


図-12 破堤の場合における最大浸水深

5. 地盤勾配が急な場合

(1) 破堤の場合

計算結果として、最大浸水深の分布を図-12に示す。本図から、地盤勾配が緩やかな場合と同様に、CASE 2の結果は、CASE 1の結果を概ね再現しているが、格子スケールが大きく分解能が粗いため詳細な浸水深の状況までは再現できていない。また、CASE 3aとCASE 3cの最大浸水深は、CASE 1の場合と同様な結果を示しており、特

に、CASE 3aが良好な結果であるといえる。

(2) 降雨の場合

計算結果として、最大浸水深の分布を図-13に示す。本図から、地盤勾配が緩やかな場合と同様に、CASE 3においてh-VA氾濫解析法の特徴である降雨時の浸水域の拡大がみられる。また、紙面の都合上示せなかったが、それぞれの解析結果とCASE 1との最大浸水深を比較すれば、CASE 2の結果はCASE 1に対して値がばらついていてのに対し、CASE 3の結果はCASE 1と45°のラインに沿って分

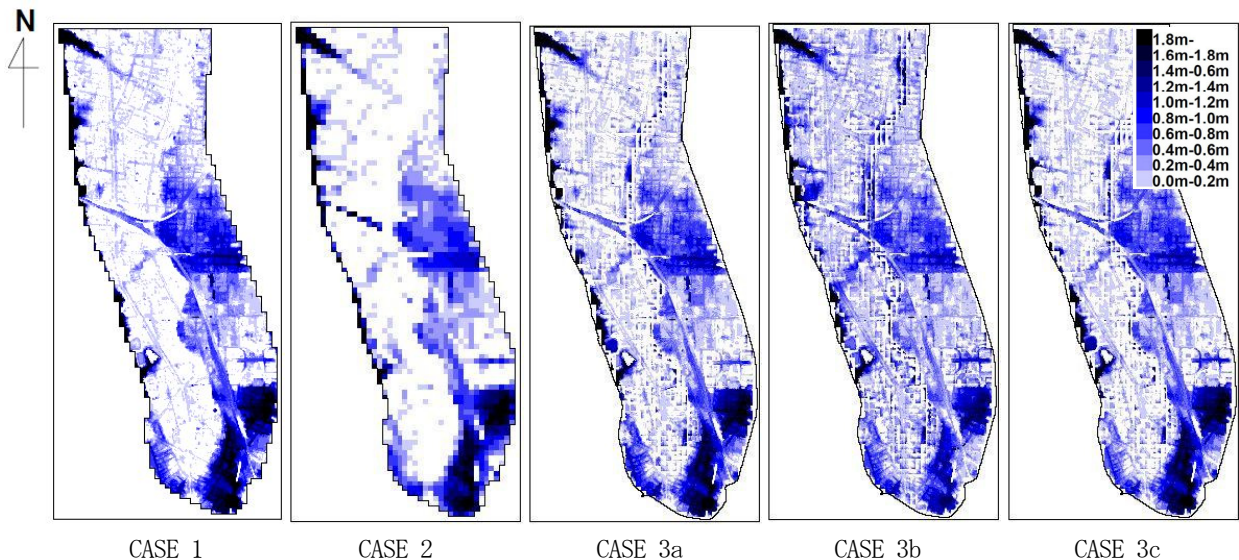


図-13 降雨の場合における最大浸水深

布しており、特にCASE 3aは良い結果を示していた。

これらの結果から、地盤勾配が急な場合の破堤および降雨を対象とした解析においても、 h -VA氾濫解析法の妥当性が示されたといえ、流量定義断面の地盤高データをそのまま用いて h - A 曲線を算出した方が良い結果となった。

表-1 計算に要した時間

	地盤勾配が緩やかな場合		地盤勾配が急な場合	
	破堤	降雨	破堤	降雨
CASE 1	144分	384分	84分	137分
CASE 2	7分	8分	3分	3分
CASE 3	12分	13分	4分	7分

6. 計算時間からみた h -VA氾濫解析法の有用性

表-1にそれぞれの計算に要した時間を示す。なお、本研究では市販のPC(NEC Express5800 Pentium(R)4 CPU3.80GHz)を用いている。これまで示してきたように、CASE 3はCASE 1と同程度の詳細な精度を有しており、かつ、表-1に示されたように多大な計算時間を要していない。したがって、計算時間の短縮という面からも、 h -VA氾濫解析法の有用性が示された。

7. おわりに

本研究では、従来の氾濫解析法の問題点を示し、簡便さと精度をあわせて向上できる新しい氾濫解析法を提示した。本計算モデルは、格子をひとつのポンドとみなして解析していくものであり、基礎式として、格子内水量の保存式と流量に関する移流項、粘性項を無視した運動方程式を用いており、格子内の h - V 曲線、流量定義位置における h - A 曲線を取り扱うことに特徴がある。

地盤勾配が緩やかな場合と急な場合で、破堤および降雨の条件下の氾濫計算を行い、従来モデルとの比較を行った。その結果、十分な精度を有していることがわかり格子が比較的大きい場合でも、計算後の処理で詳細な水

深分布を描けることも示された。さらに計算時間の短縮もはかられている。なお、本研究により、流量定義断面の地盤高データをそのまま用いて h - A 曲線を算出した方が良い結果となった。

本報では、 h -VA氾濫解析法の妥当性および有用性検討の第一段階として、最大浸水深を基に考察を進めてきた。今後は、時間的な浸水深、流速の変化およびそれに影響を与える粗度係数、適用できる格子スケール、適用できる氾濫現象などについて、詳細な検討を重ねていきたい。

参考文献

- 1) 館健一郎ら：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。
- 2) 岩佐義朗，井上和也，水鳥雅文：氾濫水の水利の数値解析法，京都大学防災研究所年報23号B-2，pp. 305-317，1980。
- 3) 例えば，秋山壽一郎，重枝未玲：河道德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，691-696，2006。
- 4) 土木学会編：水理公式集，平成11年版，p. 128，1999。
- 5) 国土地理院：数値地図5mメッシュ（標高），平成17年。

(2007. 9. 30受付)