

非構造格子を用いた氾濫解析に関する一考察

STUDY ON OVERLAND FLOOD FLOW ANALYSIS USING UNSTRUCTURED GRID

武田 誠¹・松尾直規²・中嶋大次郎³

Makoto TAKEDA, Naoki MATSUO and Daijiro NAKAJIMA

¹正会員 博士(工) 中部大学講師 工学部土木工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

²フェロー 工博 中部大学教授 工学部土木工学科 (同上)

³学生員 中部大学大学院 建設工学科専攻 (同上)

The floodplain 2D MODEL with Cartesian grid cannot express urban structure (e.g. the road and river etc.) in detail for overland flood flow analysis. Recently, overland flood flow analysis with unstructured grid is proposed and applied to various simulations for water disaster. The aim of this study is to develop the overland flood flow analysis model using unstructured grid and to evaluate the characteristics of the results obtained by the model. Though the analysis model is based on Kawaike et al model, the flux correction considered with shapes of grid side is newly proposed for the calculation of flux at the center point of grid. From the comparative analysis of Cartesian grid and unstructured grid, the validity of the model with unstructured grid is evaluated. By application of this model to an urban area, it is shown that the calculated inundated water flows on the road and spread out. The behavior of flood flow in urban area is successfully simulated.

Key Words : *Overland flood flow analysis, Unstructured grid, Urban area, Water disaster, Numerical analysis model*

1. はじめに

近年, 毎年のように水災害が発生している。多くの都市で治水対策の見直しが進められおり, 堤防天端高や下水道, 遊水地などのハード的対策のみならず, 避難対策に代表されるソフト的対策の整備が検討されている。水災の場合, 危機意識の有無や住民が浸水にあった場合どのように対処するかが非常に重要である。水災害への警鐘, また, 浸水時の基礎的情報を与える洪水ハザードマップが多くの都市で作成されている。こういったハード的, ソフト的対策を講じる際には, 氾濫解析による検討が不可欠であり, 現状においても従来からの氾濫解析法を用い, 治水施設の建設に関してそれによる知見を多用している。氾濫解析に関する研究として, 岩佐・井上・水鳥¹⁾による研究が代表的であり, その考え方は現在も多くの研究・業務に引用され, 多くの問題に適用されている。一般的な氾濫解析は河川流を一次元不定流モデルで, 氾濫域を平面二次元不定流モデルで解き, 一次元不定流モデルで得られた越水量や破堤による越流量を対応する格子に与えることで, 河川からの浸水を表現し

ている²⁾。(下水道を考慮したモデル化³⁾⁴⁾, 地下構造物を考慮したモデル化⁵⁾もあるが, ここでは表面流のみのモデル化を検討するため取り上げていない。)しかし, このようなモデル化では河川からの越水量, 越流量を与える格子形状が直交格子で構成されているため, 河川格子と氾濫格子が矛盾無く結合されていない。また, 河川部分を差し引いて格子形状を近似したとしても, 氾濫水は概ね道路に沿って流れ, 盛土があればそこで流れが遮断され, その盛り土に沿って流れが変わるため, 直交格子ではそういった都市構造物の影響を表現することは困難である。格子スケールを小さくすれば道路や小河川などを表現できるものの, 十分に表現するためにはかなり格子スケールを小さくする必要があり, その場合には計算量が膨大となる。こういった点を解決する方策として, 非構造格子を用いた氾濫解析法⁶⁾⁷⁾が提案され, 様々な場に適用されている⁸⁾。非構造格子を用いて都市域をモデル化することにより, 河川と陸域を矛盾なく結合することができ, また, 都市構造物も適切に表現することができる。したがって, 著者らも非構造格子を用いた氾濫解析法の構築を目指し, その基礎的研究として非構造格

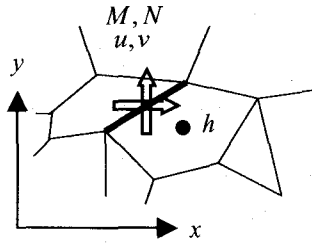


図1 未知量の配置

子を用いた氾濫解析の特性および有効性を検討した。

2. 数値解析法

ここで構築する非構造格子を用いた氾濫解析モデルは川池ら⁸⁾が提案しているものに準じる。すなわち、解析モデルのベースとなるのは、以下に示す平面二次元モデルの連続式と運動量方程式である。

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_w} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_w} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (3)$$

ここに、 u, v : それぞれ x, y 方向の断面平均流速、 h : 水深、 M, N : それぞれ x, y 方向の流量フラックス ($M = uh, N = vh$)、 H : 水位、 τ_{sx}, τ_{sy} : 水表面でのせん断応力の x, y 成分、 τ_{bx}, τ_{by} : 水底面でのせん断応力の x, y 成分、 g : 重力加速度である。

水表面でのせん断応力 τ_{sx}, τ_{sy} は以下の式で表される。

$$\tau_{sx} = \rho_a \gamma^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (4)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a \gamma^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (5)$$

ここに ρ_a : 空気密度、 γ^2 : 抵抗係数、 W_x, W_y : それぞれ高度10mの風の x, y 方向成分である。また、底面でのせん断応力 τ_{bx}, τ_{by} は以下の式で表される。

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 M \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (6)$$

$$\tau_{by} = \rho g n^2 N \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (7)$$

ここに ρ : 水の密度、 n : マニングの粗度係数である。

非構造格子を用いた氾濫解析法では、図1のように流速(u, v)、流量フラックス(M, N)を格子境界(多角形の辺の midpoint)で、水深(h)を格子の図心で定義し、有限体積法的に差分式を展開する。

連続式について、その差分式は以下の式を用いる。

$$\frac{h^{n+3} - h^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{1}{A} \sum_{l=1}^m \{M_l^{n+2}(\Delta y)_l - N_l^{n+2}(\Delta x)_l\} = 0 \quad (8)$$

ここで、 h は格子の水深、 m は格子を囲む辺の数、 A

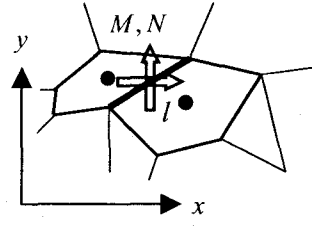


図2 運動量方程式のコントロールボリューム

は格子の面積である。 M_l, N_l はそれぞれ辺 l 上での x, y 方向の流量フラックスを表し、 $(\Delta x)_l, (\Delta y)_l$ は辺 l 上での両端の点の x 座標、 y 座標の差を表す。なお、上付き添字は時間ステップであり、辺 l は格子を囲む辺を意味する。

辺 l で定義された運動量式について、以下のような差分式を用いる。

$$\frac{M_l^{n+2} - M_l^n}{2\Delta t} + M1 + M2 = -g\tilde{h}^{n+1}(\nabla H)_x - \frac{gn^2 \frac{M_l^{n+2} + M_l^n}{2} \sqrt{(u_l^n)^2 + (v_l^n)^2}}{(\tilde{h}^{n+1})^{4/3}} \quad (9)$$

$$\frac{N_l^{n+2} - N_l^n}{2\Delta t} + N1 + N2 = -g\tilde{h}^{n+1}(\nabla H)_y - \frac{gn^2 \frac{N_l^{n+2} + N_l^n}{2} \sqrt{(u_l^n)^2 + (v_l^n)^2}}{(\tilde{h}^{n+1})^{4/3}} \quad (10)$$

ここで、 u_l, v_l は辺 l 上での x および y 方向の流速、 $(\nabla H)_x, (\nabla H)_y$ はそれぞれ格子 i, j 間の水面勾配 ∇H の x, y 方向成分、 $\tilde{h}$ は格子辺上の水深であり、図心における水深から補間して求める。 $M1, M2$ または $N1, N2$ は、それぞれ(2), (3)式の移流項であり、図2に示すような辺 l を中心とするコントロールボリュームを考えて、それぞれ次のように計算する。

$$M1 + M2 = \frac{1}{A_{cv}} \sum_{l=1}^m \{u_l \tilde{M}_l (\Delta y)_l - (v_l \tilde{M}_l) (\Delta x)_l\} \quad (11)$$

$$N1 + N2 = \frac{1}{A_{cv}} \sum_{l=1}^m \{u_l \tilde{N}_l (\Delta y)_l - (v_l \tilde{N}_l) (\Delta x)_l\} \quad (12)$$

ここで、 A_{cv} はコントロールボリュームの面積、 m はコントロールボリュームを囲む辺の数、 $\tilde{M}, \tilde{N}$ は格子の重心上の流量フラックスであり、格子辺上の流量フラックスから補完して求める。(11)式、(12)式の計算では、格子辺上の流速(u_l, v_l)の方向にしたがって、 $\tilde{M}, \tilde{N}$ には上流側格子図心の補間流量フラックスを用いる。

なお、本研究では移流項計算に用いられる上流側格子の図心の流量フラックス算出において、次式のように格子形状を考慮した重みを用いている。

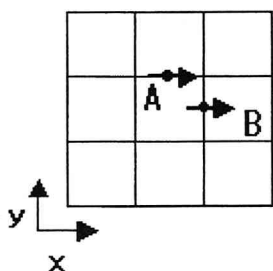


図3 格子設定の例

$$\tilde{M} = \frac{\sum M_r \cos(\alpha, n_r) / d_r}{\sum \cos(\alpha, n_r) / d_r}, \quad \tilde{N} = \frac{\sum N_r \cos(\beta, n_r) / d_r}{\sum \cos(\beta, n_r) / d_r} \quad (13)$$

ここに、 l' は格子を構成する辺であり、 $\cos(\alpha, n_r)$ 、 $\cos(\beta, n_r)$ は辺が持つ方向余弦、 d_r は辺中央と重心との距離である。

ここでの解析モデルは、式(13)を用いて川池ら⁶⁾の方法を若干修正した。本解析法は、圧力項において辺をはさむ格子間の圧力勾配を x, y 方向成分に分離している。しかし、この方法では得られる流れが格子形状に依存するものと考えられる。

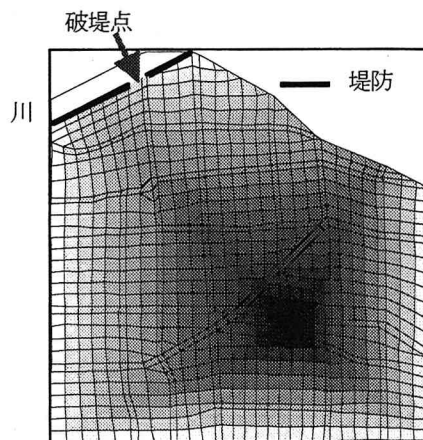
仮に図3の様な格子があった場合に、A点の x 方向流量フラックスを求める場合の圧力項はその面の法線ベクトルが y 方向に向いているためゼロになる。従って、 x 方向流量フラックスはB点のそれと比べてかなり異なることが予想できる。例えば、 $u = U(x; t)$ のような流速分布となる流れ場を計算する場合に、A点の x 方向流量フラックスは圧力項の影響を受けずに変動するため、たいていの場合B点の流れよりも小さくなる。このような解析値に対して、格子図心の流量フラックスを格子形状を考慮せずに、例えば距離のみの重みで補正するならば、その流速は実際よりも小さくなってしまう。この点を考慮し、格子図心の流量フラックス算出に(13)式を用いた。ここで用いた解析では平面方向の粘性項を省略しているため、このような問題は移流項のみに表れる。

これらのことから本解析モデルは、格子形状により流れ場が変わる可能性は否定できず、例えば地盤高を考慮した適切な格子設定も考えられ、その点も今後の研究課題として存在するであろう。都市域を対象とする場合、流れは道路に沿ったものとなるため、予想される流れ場に沿って出来る限り辺を直交させることで適切な解析ができるものと考えられる。

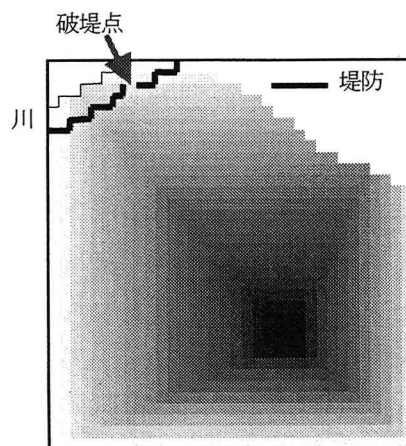
3. デカルト座標を用いた解析法との比較

3.1 計算条件

本研究では、非構造格子を用いた氾濫解析法の精度ならびにその特性の検討を行うため、名古屋市北区を中心とする領域を取り上げ、モデル領域における検討を行っ



非構造格子



デカルト座標

1.0m -4.0m

図4 計算領域

た。ここでは、従来から用いられている平面二次元モデルによる解析との比較から本解析モデルの精度について考察を行う。

ここでの検討の目的から、デカルト座標を用いた解析 (Case Aとする) と非構造格子を用いた解析 (Case Bとする) の計算条件をできる限り同じように取り扱った。

図4は格子形状と合わせて地盤高も示している。Case Aの格子幅は $\Delta x = \Delta y = 100\text{m}$ としており、Case Bでは 100m を意識しながら格子を設定した。堤防天端高は 5m とし、破堤箇所では 1m としている。河川域では水位が一様に変化するとし、水位 $\eta = 2 \sin(\text{TIME} / 12 / 3600 \times 2\pi)$ TIME : 時間(s)を与えている。また、両者とも市街地を想定し粗度係数 $0.067^9)$ としている。計算は6時間行い、河川水位が破堤点の堤防天端高 (破堤幅 200m) を越えた時点から浸水が始まる。

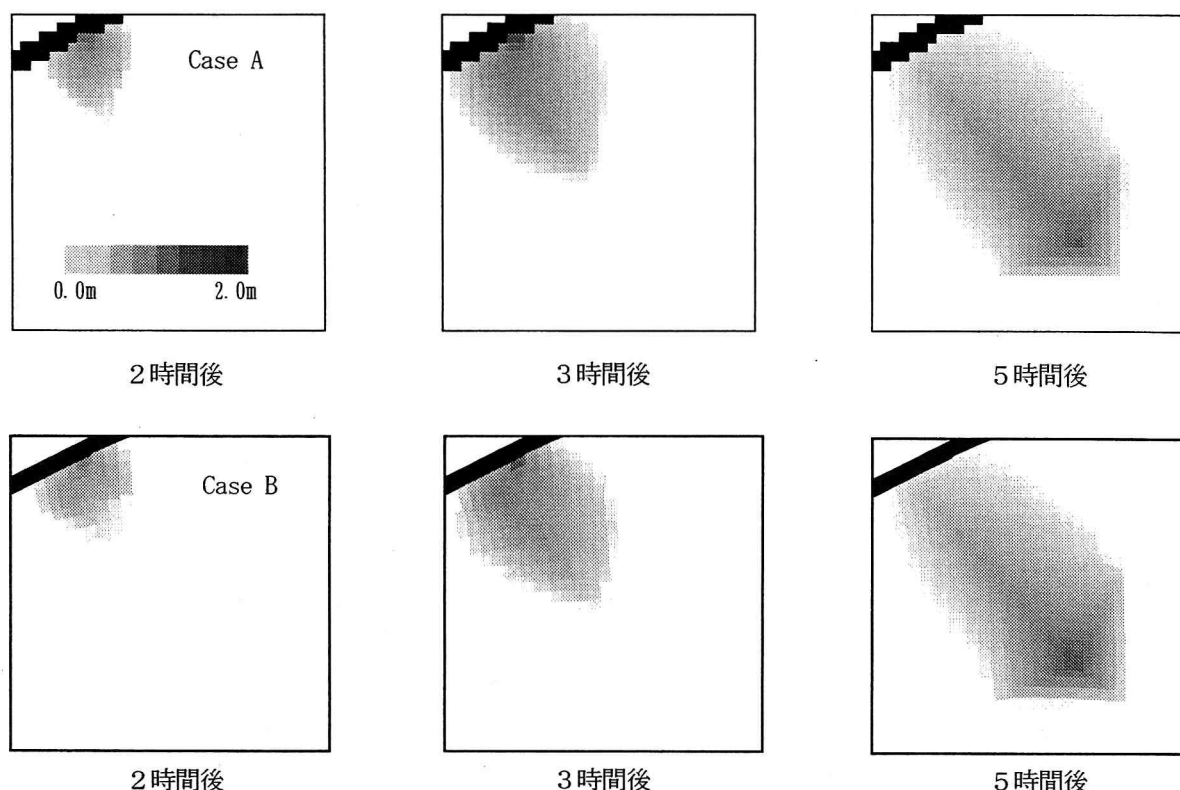


図5 Case AとCase Bの浸水深の空間分布

3.2 計算結果

計算結果として、時間毎の浸水深の空間分布を図5に示す。本図からCase AとCase Bでは同様の浸水状況を示していることが分かる。デカルト座標を用いた平面二次元モデルは広く使用されているモデルであり、現状では妥当な結果を示すものと認識されていることから、ここで示している解析モデルも平面二次元モデルと同様の精度を有しているといえ、実用上問題ないモデルであることが分かる。また、大まかな浸水深の分布を知るために地盤高のみを考慮して解析を行う場合には、非構造格子を用いる必要もなく、デカルト座標による氾濫解析でも十分であることがこの解析結果から分かる。非構造格子を用いた解析では、格子作成に多大な時間が費やされる。一方、デカルト座標を用いた解析では、格子作成は非常に楽であり、ある程度機械的に作成できる¹⁰⁾。したがって、解析目的によって適切な氾濫解析法を選択する必要がある。

また、非構造格子を用いた解析において、川池らのモデルと同様に格子中央の流量フラックスを式(14)で求めた場合と比較したところ、解析結果にほとんど差が生じなかった。これは、対象とした流れにおける移流項の効果が重力項の効果よりも極めて小さいためである。ただし、格子中央の流量フラックスを算出する場合には、格子形状の影響を考慮する方が適切であろう。

$$\tilde{M} = \frac{\sum M_r / d_r}{\sum 1 / d_r}, \quad \tilde{N} = \frac{\sum N_r / d_r}{\sum 1 / d_r} \quad (14)$$

4. 都市域への非構造格子モデルの適用

4.1 計算条件

非構造格子を用いた解析モデルを都市域に適用した場合の流れ場の特性について検討する。一般に氾濫水は道路に沿って流れ拡がることが知られている。これは、都市内の道路は概ね周辺の住区の地盤より低いためであり、さらに、構造物がないことより流れを阻害するものがないためである。したがって、このような効果を考慮し、非構造格子を用い道路格子を20cm低くした場合の解析（Case Cとする）と、Case Cの条件に粗度係数を道路では0.043¹¹⁾、住区では0.067と設定した解析（Case Dとする）を行った。

4.2 計算結果

まず、Case Cの計算結果として、図6に浸水深の空間分布を示す。本図から、氾濫水が道路に沿って流れ拡がっている様子が分かる。平成12年の東海豪雨時でもこういった氾濫形態が報告されており、定性的な氾濫水の拡がり方としては妥当であろう。また、Case Bと比較すると、道路格子を20cm低くしたことにより氾濫水の拡がりが大きくなっていることが分かる。実際の氾濫現象との比較ではないため、定量的な考察はできないが、道路などの都市構造物を考慮することで氾濫水の拡がりが速くなり、定性的には現実に即したモデルであると判断できる。

つぎに、Case Dの計算結果として、図7に浸水深の空

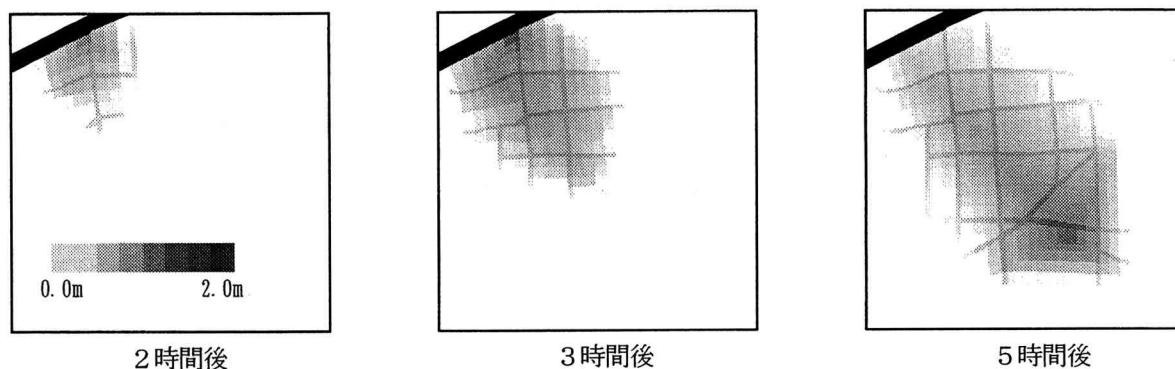


図6 Case Cの浸水深の空間分布

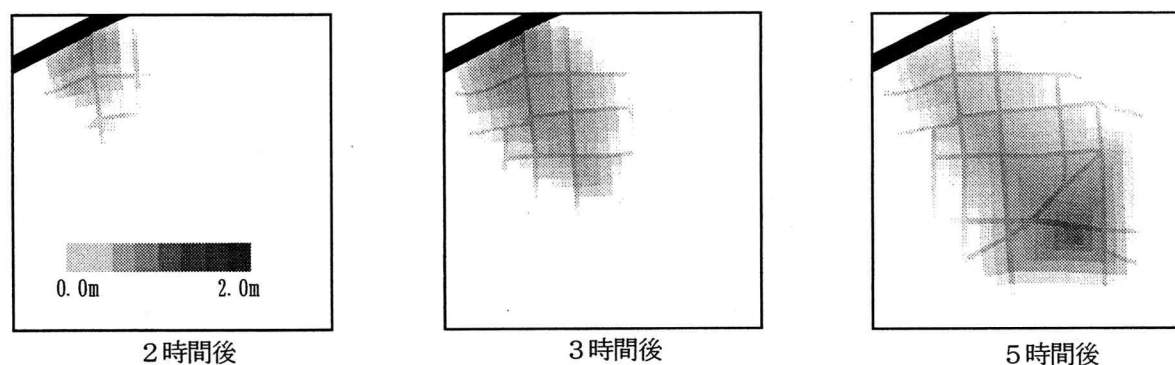


図7 Case Dの浸水深の空間分布

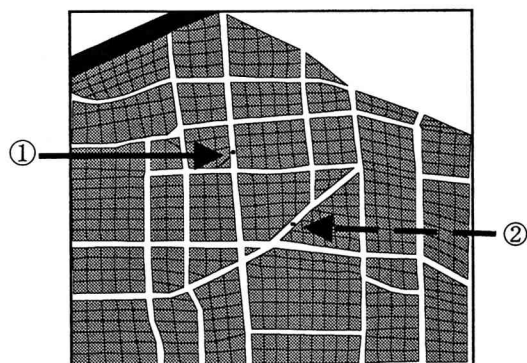


図8 浸水深の出力点

間分布を示す。本図から、Case Cと比べてわずかながら浸水が広がっていることが分かる。そこで、図8に示す場所の浸水深の時間変化を図9に示す。本図から粗度係数を変化させることで浸水が早く到達しており、浸水深もわずかながら変化していることが分かる。氾濫時における重要な水理学的事象は、浸水の広がりや深さ、避難時に遭遇する流速と浸水の到達時間である。これらを詳細に知るためには、氾濫水の挙動を適切にモデル化することが重要となってくる。氾濫解析においては、構造物に関わる影響のモデル化や支線を含めた下水道システムのモデル化、側溝や小河川などのモデル化などまだ数多くの課題が残されている。そのような現状において、避難などの重要な課題を検討するためには、少なくとも氾濫水の広がりやの支配的因子である道路や盛土などを適切

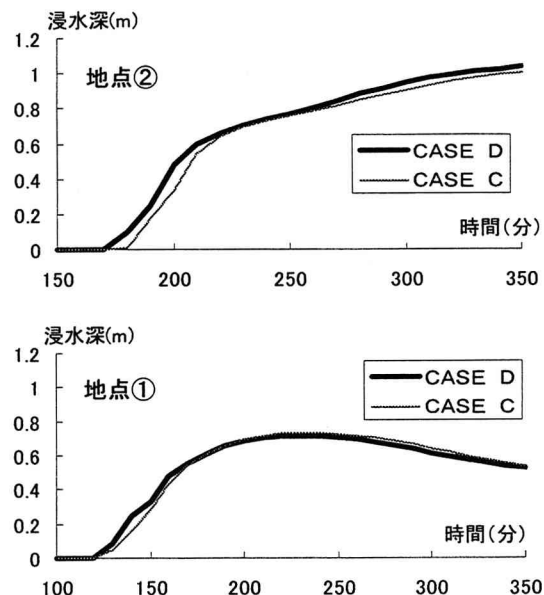


図9 浸水深の時間変化

にモデル化することが重要になると考える。

また、水災を軽減するためには住民が危機意識を持ち適切に行動することが重要となる。それらの啓蒙活動の一環としてハザードマップの作成が挙げられるが、ハザードマップには説得力がなければならない。例えば、図5と図7を比べると、明らかに図7の方が都市域を表していることが想像でき、説得力があるように思える。仮にデカルト座標を用いて道路形状を表現した場合に、

滑らかな表現が出来ないため違和感が生じる恐れがある。住民への説明のためには、説得ある計算条件と共に説得力ある解析法が望まれるであろう。そういった観点からも、ここで検討した非構造格子を用いた氾濫解析法は有効であると考えらる。

5. おわりに

本研究では、非構造格子を用いた氾濫解析法の構築を目指し、川池らの解析モデルを踏襲しながら、その解析モデルの精度および特性について検討を進めていった。得られた結論をまとめると、以下のとおりである。

●非構造格子を用いた解析モデルを検証し、格子中央の流量フラックス算出に関して、辺の形状を重みに用いた方法を提案した。

●非構造格子の形成において、地盤高を考慮した適切な格子配置の可能性を示唆した。

●地盤高のみを用いて氾濫解析を行った場合、ここで構築した非構造格子を用いた氾濫解析法は、従来の平面二次元解析法と同程度の精度を有していることを示した。

●非構造格子を用いた解析では、道路など都市構造物が容易に表現できるため、都市域の氾濫解析に適していることを示した。

●非構造格子を用いた解析では、得られた結果に説得力がでるため、住民説明を考えた場合に有効であるといえる。

本研究により、非構造格子を用いた氾濫解析法が構築できた。今後は、東海豪雨時の浸水など実際の氾濫災害を対象に解析を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 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, 第23号B-2, pp. 305-317, 1980.
- 2) 愛知県建設部, 愛知県氾濫シミュレーション技術検討会: 新川・日光川・境川流域の浸水想定 水災の軽減と危機管理の推進にむけて, 2002.
- 3) 中村武弘, 岩佐義朗, 野口正人: 都市域における洪水排水システムの総合的評価法, 第33回水理講演会論文集, pp. 349-354, 1989.
- 4) 武田 誠, 松尾直規: 下水道システムを考慮した氾濫解析法に関する数値解析的研究, 水工学論文集, 第44巻, pp. 467-472, 2000.
- 5) 戸田圭一, 井上和也, 前田 修, 谷野知伸: 大都市の地下空間の氾濫浸水解析, 水工学論文集, 第43巻, pp. 539-544, 1999.
- 6) 井上和也, 川池健司, 戸田圭一: 非構造格子による氾濫解析モデル, 京都大学防災研究所年報, 第42号B-2, pp. 339-353, 1999.
- 7) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 浦 勝, 有田由高: 非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面二次元洪水数値モデル, 水工学論文集, 第45巻, pp. 895-900, 2001.
- 8) 川池健司: 都市における氾濫解析法とその耐水性評価への応用に関する研究, 京都大学学位論文, 2001.
- 9) 水理公式集: 土木学会, p. 131, 1999.
- 10) 大坪郁宜, 櫻井耕史, 武田 誠, 松尾直規: GISを用いた氾濫解析システムに関する研究, 水工学論文集, 第45巻, pp. 877-882, 2001.
- 11) 水理公式集: 土木学会, p. 132, 1999.

(2002. 9. 30受付)