

非構造格子を用いた津波氾濫解析の 現地適用と陸上構造物の影響評価

FIELD APPLICATION OF COMPUTATIONAL TSUNAMI FLOOD ANALYSIS
USING UNSTRUCTURED MESH AND ASSESSMENT OF LAND STRUCTURES

西畑 剛¹・森屋陽一²・関本恒浩³

Takeshi NISHIHATA, Yoichi MORIYA and Tsunehiro SEKIMOTO

¹正会員 修(工) 五洋建設(株) 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²正会員 博(工) (財)沿岸技術研究センター(〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

³正会員 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

In this study, we introduced flood analysis using unstructured meshes to tsunami inundation computation. At first, we verified its validity for the tsunami inundation case by comparing with the result provided with usual numerical simulation using normal spatial meshes. Secondary, we applied it to the supposed case of the earthquake-induced tsunami at the area of Kesennuma bay under the condition that coastal defense facilities were deposed and the effect of houses were considered as the residential dominated ratio inside the mesh or water transparent ratio from the neighboring road meshes.

The simulation using unstructured meshes well reproduced local inundation flow around the land structures. And it implied that residences generally had mitigation effect for tsunami inundation disaster but it locally increased tsunami hazard especially on the road in case urbanization was progressed.

Key Words : *Unstructured mesh, computational analysis, tsunami, inundation, Kesennuma,*

1. はじめに

津波による浸水災害時、避難経路上における浸水流を精度よく把握することは、防災検討上重要である。特に市街化が進んだ沿岸域において、避難経路周辺の家屋等陸上構造物が浸水流れに与える影響は大きい。こうした市街化の影響を強く受けた遡上波は津波先端の到達時間や遡上波流速が市街化していない地域と比べて異なることが予想され、これらの効果を考慮する必要があると考えられる。

数値計算による検討を行う際に家屋による影響は、通常、建物占有率に応じた粗度係数を与えて摩擦項という形で取り込むが、この手法では構造物形状や配置に起因する局所的な流れを表現することはできない。これを再現するためには空間格子をより細かくする方法¹⁾や建物形状をVOSモデルによって再現する方法²⁾等の研究があるが、計算負荷や地形データの整備コスト増大といった課題がある。

本研究では、津波浸水計算に対して一般的に用いられるスタッガード格子(正方形構造格子)による差分スキームを凸多角形格子へ拡張した非構造格子による津波浸水計算を行う。本手法は格子形状に自

由度があるため、建物や沿岸防護施設形状の再現を行う場合、構造格子によって再現する場合と比べ格子数を増やさず行うことが可能である。また支配方程式は非線形長波方程式であり、流体直接解析法を用いたVOSモデルによる方法と比べても計算負荷が大きくならないメリットがある。

本手法は主に河川の氾濫解析に活用されて来たが、本研究ではまず津波浸水計算に対する適応性を検証する。そして実サイトの津波浸水計算へ応用・高度化することで、市街陸上構造物の影響を受けた津波流れの特性を抽出し、避難時等に防災上留意すべき事項について考察することを研究目的とする。

2. 数値計算手法

本研究では津波浸水の数値計算手法として、一般的に用いられる正方形格子(構造格子)による浸水計算に従った方法と非構造格子による方法について比較検討する。いずれも非線形長波方程式を差分スキームに基づいて変数離散化している。以下、両計算手法の概要およびモデル地形への適用例を示す。

(1) 構造格子による方法

一般的に用いられる非線形長波方程式に対し、空間方向にスタガード格子による差分、時間方向にはリープフロッグ法を適用し、風上差分によって数値計算を進める。以下に連続式、運動量式を示す。

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{D^{4/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{D^{4/3}} \quad (3)$$

ここで D : 全水深, M, N および u, v は x, y 方向への線流量, 断面平均流速, η : 水位, g : 重力加速度, n : マニングの粗度係数である。なお遡上域では小谷ほか³⁾に従った土地利用に応じた粗度設定および遡上計算を行うこととする。

(2) 非構造格子による方法

非構造格子による浸水計算は川池ほか⁴⁾によって開発されている。本研究も数値計算手法の概略は同様であるが、遡上先端条件および住区通過率の設定に変更を加えた。

数値計算は、構造格子による場合と同様、(1)～(3)の連続式、運動量式からなる。各変数は図-1の通り定義し、その離散化は図-2, 3 に示すコントロールボリュームを考慮して、以下の通り行った。

$$\frac{D_i^{n+3} - D_i^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{1}{A_i} \sum_{l=1}^m \{M_l^{n+2}(\Delta y)_l - N_l^{n+2}(\Delta x)_l\} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{M_L^{n+2} - M_L^n}{2\Delta t} + M_1 + M_2 = \\ -g\tilde{D}_L^{n+1}(\nabla \eta)_x - \frac{g\tilde{n}_L^2}{2} \frac{M_L^{n+2} + M_L^n}{\tilde{D}_L^{4/3}} \sqrt{(u_L^n)^2 + (v_L^n)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{N_L^{n+2} - N_L^n}{2\Delta t} + N_1 + N_2 = \\ -g\tilde{D}_L^{n+1}(\nabla \eta)_y - \frac{g\tilde{n}_L^2}{2} \frac{N_L^{n+2} + N_L^n}{\tilde{D}_L^{4/3}} \sqrt{(u_L^n)^2 + (v_L^n)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、辺 L における運動量式中の移流項は格子重心位置での補間流量フラックスを用いて次の通り表される。

$$M_1 + M_2 = \frac{1}{A_{cv}} \sum_{l=1}^m \{u_l \hat{M}_l (\Delta y)_l - (v_l \hat{M}_l (\Delta x)_l)\} \quad (7)$$

$$N_1 + N_2 = \frac{1}{A_{cv}} \sum_{l=1}^m \{u_l \hat{N}_l (\Delta y)_l - (v_l \hat{N}_l (\Delta x)_l)\} \quad (8)$$

補間流量フラックスは各辺中点からの距離の逆数に

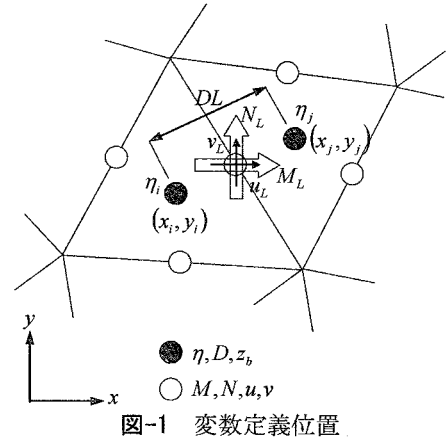


図-1 変数定義位置

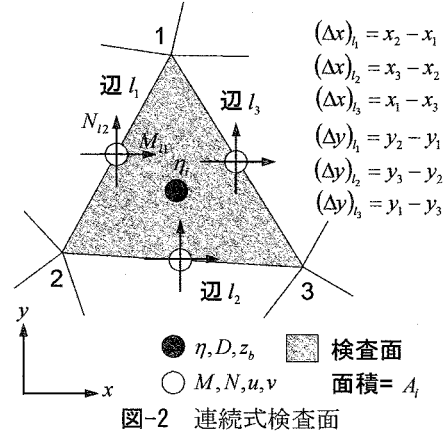


図-2 連続式検査面

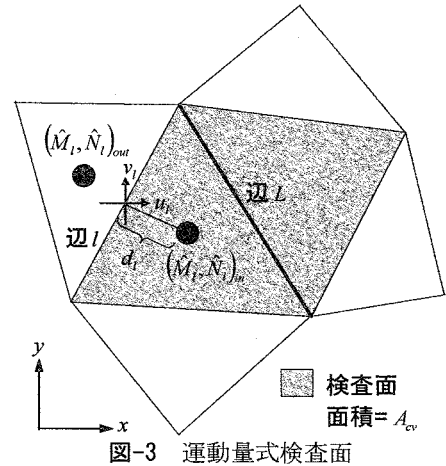


図-3 運動量式検査面

比例した形で次の通り定義される。なお $\hat{M}$, $\hat{N}$ は検査面周囲の辺 l での流体流入方向に応じて検査面内外の値を使い分ける (図-3 参照)。

$$\hat{M} = \frac{M_1/d_1 + \dots + M_m/d_m}{1/d_1 + \dots + 1/d_m} \quad (9)$$

$$\hat{N} = \frac{N_1/d_1 + \dots + N_m/d_m}{1/d_1 + \dots + 1/d_m} \quad (10)$$

その他の項は次の通りである。

$$(\nabla \eta)_x = \frac{(D_j + z_j) - (D_i + z_i)}{DL} \cos \theta \quad (11)$$

$$(\nabla \eta)_y = \frac{(D_j + z_j) - (D_i + z_i)}{DL} \sin \theta \quad (12)$$

$$\cos \theta = \frac{x_j - x_i}{DL}, \quad \sin \theta = \frac{y_j - y_i}{DL} \quad (13)$$

$$\tilde{D}_L = \frac{D_i/d_i + D_j/d_j}{1/d_i + 1/d_j} = \frac{d_j D_i + d_i D_j}{d_i + d_j} \quad (14)$$

$$\tilde{n}_L = \frac{n_i/d_i + n_j/d_j}{1/d_i + 1/d_j} = \frac{d_j n_i + d_i n_j}{d_i + d_j} \quad (15)$$

ここで z_i は格子 i の地盤高である。

なお遡上先端条件は川池ほか⁴⁾は越流公式によって与えているが、本研究では津波浸水計算で一般的に用いられる小谷ほか³⁾の方法に従った。また道路格子から住区への通過率 $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$ を設定して、より現実的な街路流れをシミュレートする。さらに後述する検討サイト（気仙沼市大川北部）への適用にあたっては、格子生成の簡便性を考慮して住区内の建物形状は直接格子要素として表現せず、住区内建物占有率 $\lambda (0 \leq \lambda \leq 1)$ を与える。

建物占有率 λ を取り込んだ連続式、道路要素－住区要素間において通過率 β を設定した補正流量フラックスを以下に記す。

$$(1 - \lambda) \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial M^*}{\partial x} + \frac{\partial N^*}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

$$M^* = \beta M, N^* = \beta N \quad (17)$$

なお、川池ほか⁴⁾は通過率を連続式中の流量フラックスのみに乗じているが、本検討では補間流量フラックス計算の際にも通過率を乗じた流量フラックスを用いている。これにより非線形性が卓越する遡上域の住区近接街路において、住区通過率が小さい場合には補間流量フラックスは街路方向を指向し、街路流の精度向上が期待できる。

(3) モデルの比較検証

検討サイトにおける計算を行う前に、一般に用いられる土地利用を粗度係数によって評価する遡上計算（構造格子）と建物形状を格子に取り込んだ計算（非構造格子）に関するモデルの比較を行った。検討は家屋占有率を変化させた市街地モデル地形（陸域から海域にかけて一様 2% 勾配の等水深線海岸）に対して波高 2m、周期 4 分の正弦波を沖合から入射させて行った。計算地形は表-1 に示す 3 ケースとし、陸上部には汀線から密集度の異なる住区配置を想定する。構造格子計算は 5m 正方形格子とし、非構造格子計算では、個々の家屋形状を格子化する。計算は、次の 3 パターンで行った。

a) 構造格子モデル：陸上遡上時には家屋占有率に応じて表-1 中の粗度係数を用いる。

b) 非構造格子モデル ($\beta=1$)：構造格子計算との比較のため、建物要素内を水が透過かつ陸上粗度係数も同じ条件（表-1）で与える。

検討地形	A	B	C
居住区密度	低密度	中密度	高密度
家屋占有率	10%	35%	65%
粗度係数	0.04	0.06	0.08

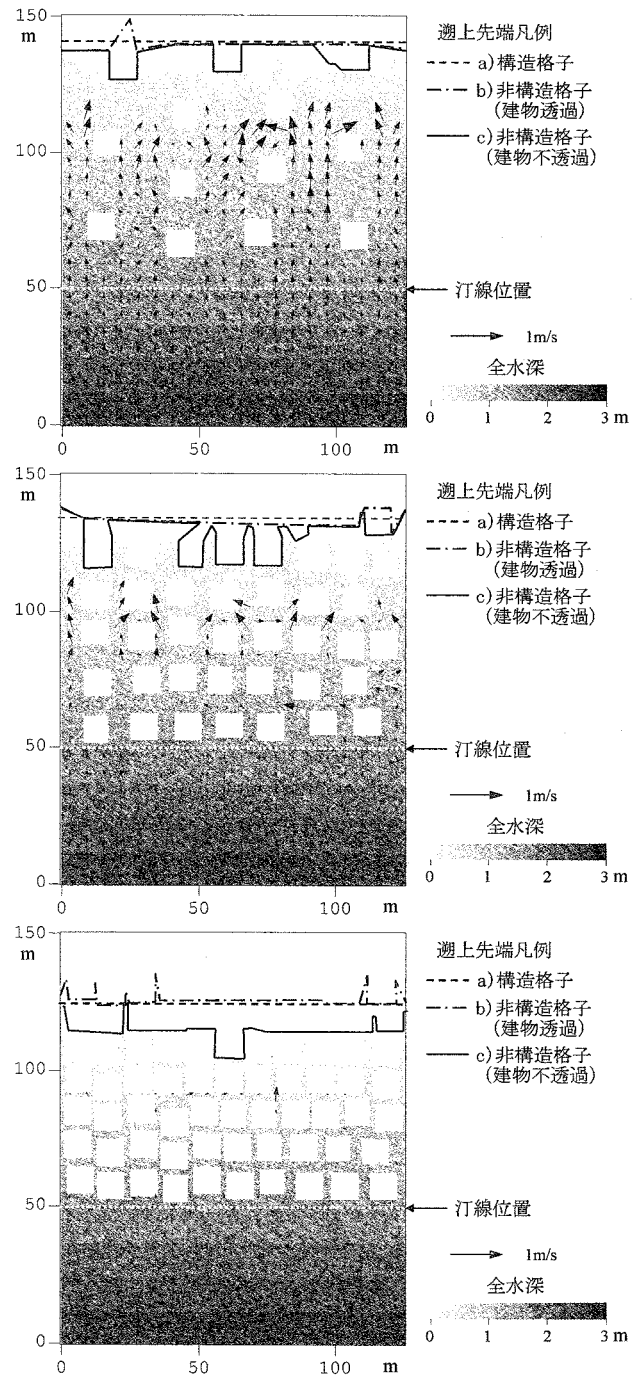


図-4 浸水範囲の比較（上：地形 A，中：地形 B，下：地形 C；白色：建物または非構造格子計算非浸水範囲）

c) 非構造格子モデル ($\beta=0$)：建物要素内へ水は透過しない場合を計算する。

図-4 に各検討地形・各計算モデルに対する浸水範囲の比較を示す。なお図にはモデル c) の浸水深と $t=2$ 分における流速ベクトルを表示している。a)，

b)の両計算モデルに対し、浸水範囲は、計算格子形状の違いによるばらつきはあるもののほぼ一致する。非構造格子を用いた津波計算は構造物がない場合には、構造格子計算と同等の浸水範囲を与えることがわかる。一方、c)では建物側面と背後における流速・流向差や、居住区密度の増加に伴う遡上先端の局地的後退など、陸上建物の浸水に対する影響が見られる。非構造格子による建物形状を格子に取り込んだ効果といえる。

3. 現地サイトへの適用

(1) 検討位置

前章で検討した計算手法を宮城県気仙沼市大川北部地域に対し適用した。当地区は気仙沼湾奥の大川左岸側に位置する。写真-1 に検討範囲全景を示す。

検討範囲沿岸部は埋立て埠頭として利用されており、背後は住宅地であり人口の集中が見られる。また一部に胸壁や河川堤防が配備され、津波時には防護施設として機能することが期待される。図-5 に検討位置および防災施設配置を示す。

(2) 想定地震および津波計算の流れ

想定地震として検討地点で大規模な浸水が予測される連動型宮城県沖地震を採用した。計算では宮城県防災会議地震対策専門部会⁵⁾による断層パラメー

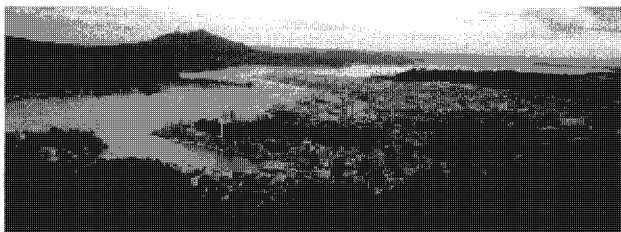


写真-1 気仙沼湾全景（右側が大川北部の市街）

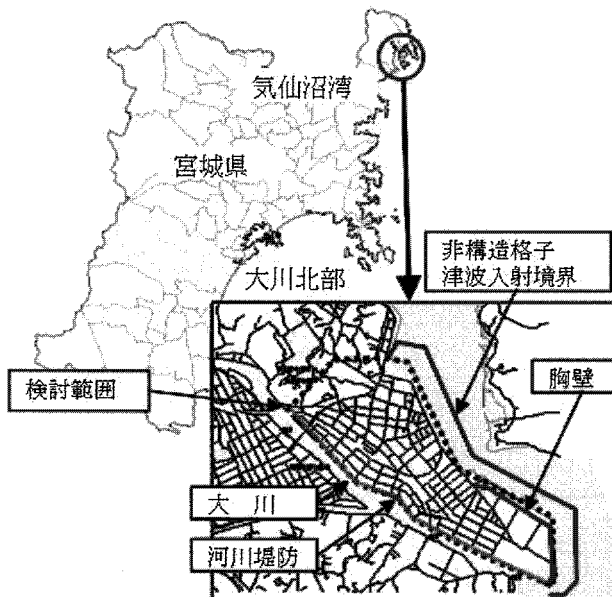


図-5 計算領域

タに対してアスペリティを考慮しないパターンを考え、Mansinha & Smylie⁶⁾の手法に従って静的に海底地盤変位を計算し、これを初期水位として与えた。なお潮位はTP+0.75m（潮望平均満潮位）とした。津波の伝播は深海域では線形長波理論を、検討域近傍の浅海域では非線形長波理論を適用した。空間格子は検討領域が近づくにつれ格子間隔を337.5m, 112.5m, 37.5mと順次細かくして領域接続し、最終的には12.5mで地形を再現し、検討範囲の遡上計算を行う（構造格子）。一方、非構造格子による浸水計算はこれまで洪水解析などに適用されており、この場合は破堤点より流量ハイドログラフを与えることによって計算を進めている。本研究では、津波伝播計算最終領域に含まれる検討範囲沖合にて、構造格子と非構造格子の形状・座標を一致させ、その位置における伝播計算の水位と線流量を抽出し、これらを非構造格子計算時の境界条件として与える。

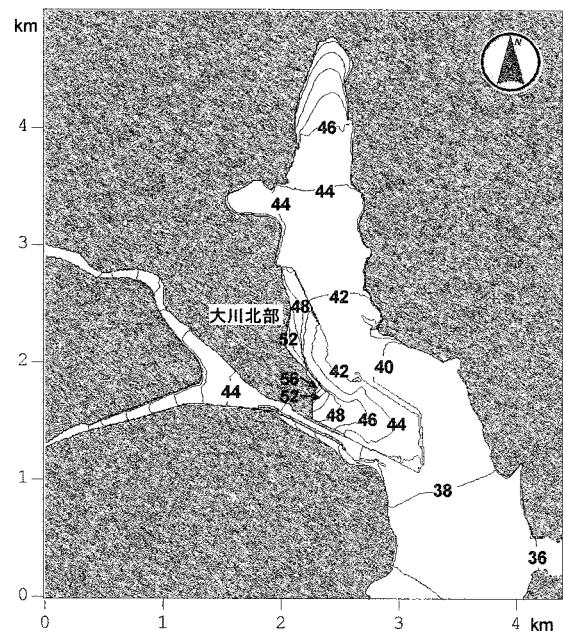


図-6 浸水開始時間（構造格子）

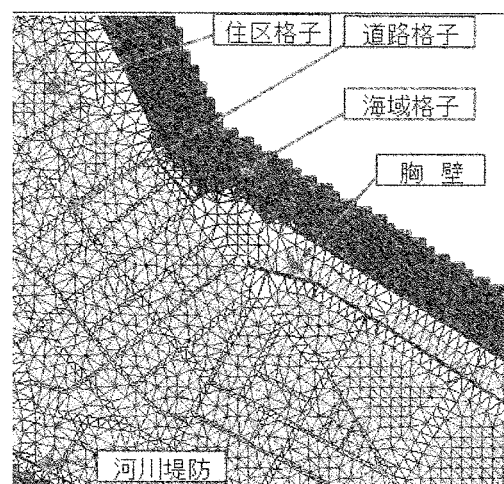


図-7 非構造格子図（一部拡大図）

(3) 構造格子による浸水計算

構造格子による計算は(2)で述べた最小格子サイズ(12.5m)の領域においてそのまま遡上計算を行った。図-6に検討領域における浸水開始時間を示す。検討範囲では地震発生後およそ40分以降から津波による遡上が計算されている。

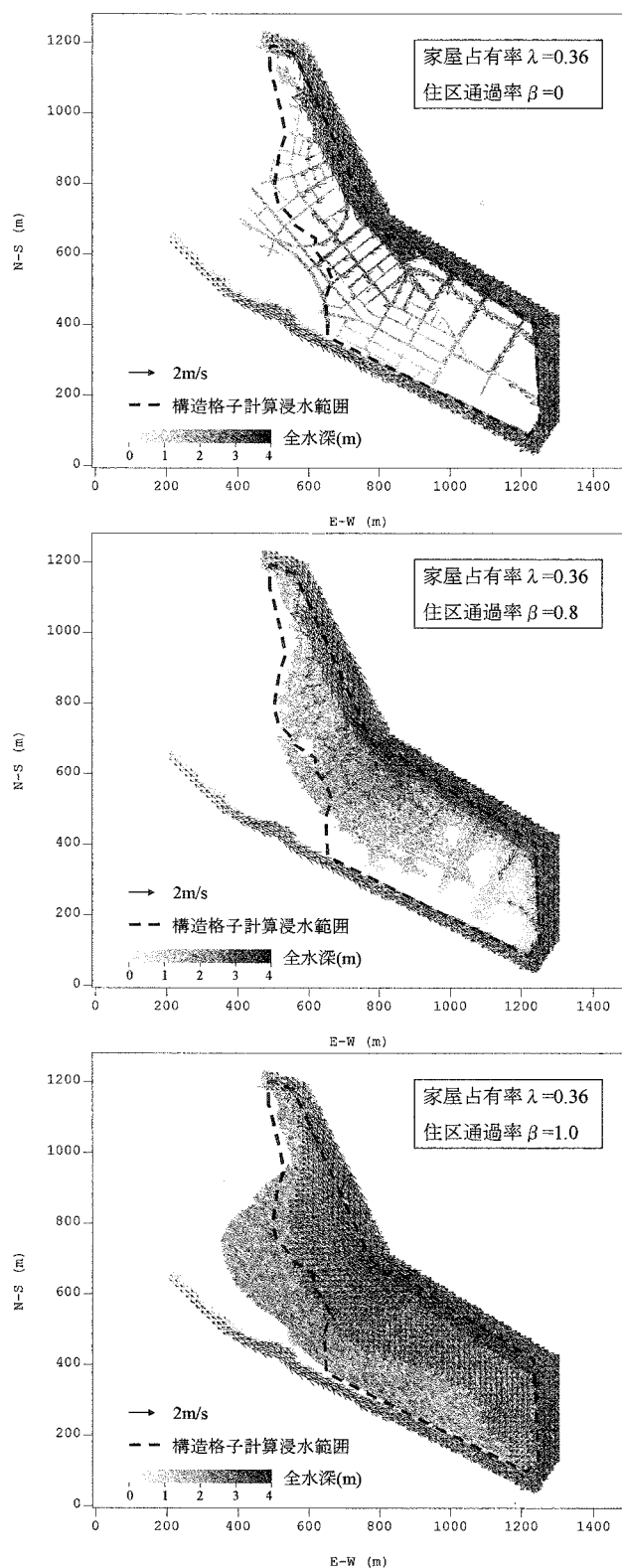


図-8 住区通過率別浸水計算結果

(4) 非構造格子による浸水計算

非構造格子計算においては、沖合の境界は構造格子計算にあわせ12.5m正方形格子とし、遡上範囲は凸多角形にて住区や街路、沿岸防災施設を反映するよう格子を作成した。図-7に作成した非構造格子の一部を示す。各格子には地盤高の他、こうした住区や道路、海域といった属性を与えている。

気仙沼地点への非構造格子計算にあたり、建物占有率 λ は、実サイト住区内における建物占有率の平均値 $\lambda=0.36$ を用いた。また通過率に関しては、 $\beta=0, 1.0$ および中川⁷⁾にならって建物占有率を考慮した $\beta=\sqrt{1-\lambda}=0.8$ とした3ケースを想定した。

図-8に各ケース最終浸水範囲を示す。なお図中には構造格子による計算結果(浸水範囲)を併記している。図中のベクトルは $t=45$ 分の浸水が拡大している時間帯の流速を示す。但し、ここでの表示は、非構造格子重心で得られた計算結果を格子内で一様と見なし、5m正方形格子点上でその値を再配分したものである。 $\beta=0$ および0.8と道路から住区へ

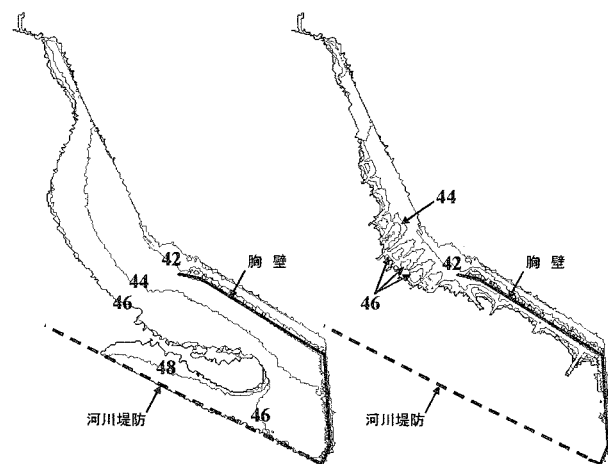


図-9 避難不能範囲・時間の比較
(左: 通過率 $\beta=1$, 右: 通過率 $\beta=0.8$)

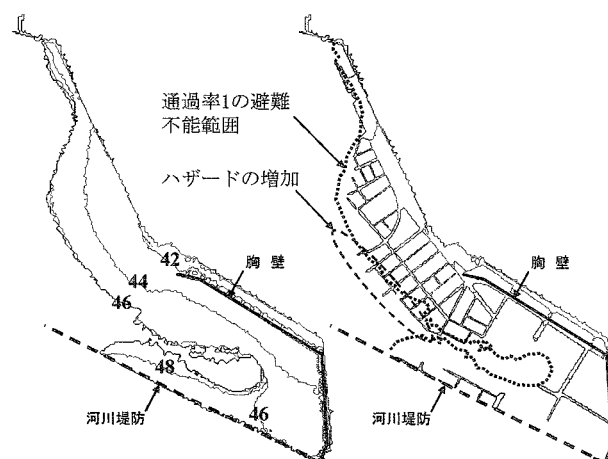


図-10 避難不能範囲・時間の比較
(左: 通過率 $\beta=1$, 右: 通過率 $\beta=0$)

の通過に制約がある場合は、浸水量の多い胸壁北側の岸壁から街路沿いに津波流れが発生していることがわかる。一方、 $\beta=1.0$ と住区通過を制限しない場合、氾濫水は浸水箇所から道路や建物の影響を受けず四方に広がることからわかる。浸水範囲は通過率 1.0 の場合、構造格子計算に比べやや浸水範囲が広がっている。非構造格子計算では住区粗度は検討域の平均建物占有率 0.36 を勘案して一様(0.06)に与えたが、検討範囲中心付近は市街が発達しており、構造格子計算では 0.06~0.11 と比較的大きな粗度を与えたことが原因と考えられる。逆に通過率 0.8 のケースでは検討域南部で浸水が見られない箇所がある。この範囲では道路要素が疎であり、胸壁や河川堤防背後が住区と接する場所が多く、流入が制限されたためと考えられる。

(5) 陸上構造物が津波避難へ及ぼす影響

陸上構造物の影響を受けた津波氾濫流れが、人間の避難に対してどのような影響を与えるかを検証するために、非構造格子住区通過率毎に避難不可能となった領域・時間帯を算定した。結果を図-9,10 に比較する。なお、津波浸水流による避難可否判定は西畑ら⁸⁾に従い、年齢・性別に応じて計算流速と水深から限界歩行速度を求めることにより行った。ここでの避難限界条件は、50 歳代の男性を対象として、歩行速度 0.5m/s 以下あるいは水深 70cm 以下となった場合とした。

通過率 0.8 としたケースにおいて、胸壁北側を回り込んだ流れは遡上開始地点付近で街路沿いに強い流れを発生させ、道路上では住区に対し、避難不能となる時間が相対的に早まる傾向にある。また津波は街路を進むにつれて住区への流入や反射などによって減勢するため、内陸部では通過率 1 のケースと比べハザードは減少する傾向にある。一方、住区通過率を 0 とした場合(市街化が進んだ場合)による計算では、検討域南側では同様にハザードは減少傾向にあるが、街路が発達した検討範囲中心付近ではハザードが増加する場所も見られる。

以上より住区と街路を区別した津波浸水計算を行った場合、建物自体は運動量を伴う津波を減勢させることにより津波ハザードを減少させる効果がある。一方で、著しく発達した市街では街路流によって局所的にハザードが増加する領域が現れる可能性が示唆される。

4. まとめ

(1) 非構造格子による計算所要時間は比較的短く、格子形状の自由度が高いため構造格子計算と接続させることが容易である。そのため、住区や沿岸防護施設等、陸上構造物地形を考慮した津波浸水計算を

簡易的に行うことが可能となった。

(2) 土地利用に応じて粗度係数を設定する一般的に用いられる津波浸水計算と同条件下における非構造格子による計算をモデル地形で比較した結果、浸水範囲はほぼ一致した。これに加え建物地形を取り込んだ非構造格子による計算では街路に沿った津波氾濫流れの再現が可能であり、津波浸水災害に対する非構造格子モデルの適用性が検証された。

(3) 津波は道路上では住区より避難不能となる時間が早まる傾向があり、住区自体は津波を緩衝する効果がある。

(4) 津波からの避難を考えた場合、街路を走る浸水流流速や浸水範囲の局所的な変動は、防災上危険側に作用する場合もあり注意が必要であることが、避難限界外力の空間的分布から示唆される。

(5) 非構造格子による津波計算にあたって、時間・空間格子サイズや形状に起因する計算安定条件や精度については不明であり、今後の課題である。

謝辞：本研究の非構造格子計算は、京都大学防災研究所川池准教授の開発プログラムを津波浸水計算用に改良を加えて行った。プログラムを使用させていただいたことに謝意を表し、ここに記します。

参考文献

- 1) 劉 曉東, 堺 茂樹, 小原忠和, 三上 勉, 岩間俊二, 今村文彦, 首藤伸夫: 市街地への津波遡上・氾濫に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 341-345, 2001.
- 2) 安田誠宏, 平石哲也, 永瀬恭一, 島田昌也: 流体直接解析法による臨海部の浸水リスク解析, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 301-305, 2003.
- 3) 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫: GIS を利用した津波遡上計算と被害推定, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 356-360, 1998.
- 4) 川池健司, 井上和也, 林 秀樹, 戸田圭一: 都市域の氾濫解析モデルの開発, 土木学会論文集, No. 698/II-58, pp. 1-10, 2002. 2
- 5) 宮城県防災会議地震対策専門部会: 宮城県沖地震被害想定調査に関する報告書, 2004.
- 6) Mansinha, L. and D.E.Smylie: The displacement fields of inclined faults, *Seismol. Soc. Amer.*, Vol.61, pp.1433-1440, 1971.
- 7) 中川 一: 洪水および土砂氾濫災害の危険度評価に関する研究, 京都大学学位論文, 1989.
- 8) 西畑 剛, 森屋陽一, 田村 保, 瀧本浩一, 三浦房紀: 津波浸水時の避難条件に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 1256-1260, 2005.