津波遡上計算におけるメッシュ分割の影響に関する基礎検討

Basic Study of Effects of Mesh Division on Run-up Tsunami Simulation

村嶋陽一¹・今村文彦²・越村俊一³

Yoichi MURASHIMA, Fumihiko IMAMURA, Syunichi KOSHIMURA

Mesh division of geographic model effects on results of run-up tsunami simulation. Recently, approximate accuracy of geographic models increase with using LIDAR (airborne laser). And run-up tsunami simulation using mesh of several meters came to be done. In this study, we study effects of mesh division on inundation area of run-up tsunami simulation. To exclude the effects of various conditions of the tsunami simulation, we designed the simplified probability calculation model. The calculation model determines the reaching probability of tsunami inundation area. As a result, the tendency that inundation area of run-up tsunami simulation decreases as mesh size decrease was theoretically confirmed.

1. はじめに

数値計算により求められる津波遡上の浸水範囲は、使用している地形モデルの影響を強く受ける。近年、LIDAR（航空機搭載型レーザスキャナー）により、精度良い地形データを広域で得ることができるようになった。LIDARの1点/m³以上の高密度で、高さ精度20cm以下の地盤高のデータ群は、津波遡上計算の数mのメッシュサイズに対し、十分に大きな密度・精度を有している。

このLIDARデータを用いることで、地形モデルの近似精度が格段に上がり、近年、数m程度の空間メッシュの津波遡上計算も数多く行われるようになってきている（村嶋ら、2006；今村ら、2004；岩手県、2004など）。

これまで適切なメッシュサイズの検討や、多量の地盤高データ群から地形モデルを作成する手法が津波遡上計算結果に及ぼす影響について議論されることは少なかった。しかし、地形モデル上で実施される津波遡上計算において、メッシュサイズや地形モデル作成手法が浸水範囲等の結果に及ぼす影響は大きい。村嶋ら（2006）は、LIDARデータを用いた5～40mメッシュの津波遡上計算結果を比較し、メッシュサイズが小さく、空間解像度が高くなるに伴い、浸水範囲は小さくなる傾向があることを報告している。この要因として、空間解像度が高くなると、地形の近似精度が上がり、地盤のより細かい凹凸が地形モデルに反映されることが挙げられている。

本研究は、津波遡上の広がり进行评估する確率論的評価

モデル（以下、確率計算モデル）を考案し、津波遡上計算におけるメッシュ分割および地盤高の算出方法の影響を定量的に評価することを目的としている。

2. 研究方法

(1) 確率論的評価モデルの考え方

津波遡上計算では、Staggered格子を用いたLeap-frog差分法による非線形長波理論が一般的に用いられている。津波遡上計算では、津波先端条件等の諸条件の設定と、線流量・津波水位の時空間変位過程が相互に影響を及ぼす。このため、メッシュ分割を変えた津波遡上計算の結果からでは、地形モデルのメッシュ分割の影響のみを定量的に評価することは困難である。

そこで、本研究では正方格子を用いた差分法による津波の遡上を確率で評価するモデルを考案した。このモデルは、遡上した津波氾濫水（以下、氾濫水）の広がり、氾濫水の先端が到達判定ラインまで到達する確率（到達確率）で評価するものである（図-1）。

図-1 メッシュ分割と氾濫水の到達判定

1 正 会 員 修(水) 国際航業株式会社 海洋情報室長
2 正 会 員 工博 東北大学教授 大学院附属災害制御研究センター
3 正 会 員 博(工) 東北大学准教授 大学院附属災害制御研究センター

この確率計算モデルでは、氾濫水の浸水は各メッシュの地盤高と氾濫水水位との比較のみで判断し、水位より地盤高が低いメッシュを浸水可能メッシュとする(図-2)。さらに、理論式を解く物理計算は行わず、浸水可能メッシュとなる確率を設定することで、到達確率を算定する。

図-2 各メッシュの浸水判断

(2) 到達確率の算定

到達確率の算定は、以下の手順で行った。

- ① 1×1～5×5のメッシュ分割において、氾濫水の先端が到達判定ラインまで到達する、浸水可能メッシュの分布パターン(図-3)(以下、到達パターン)を抽出する。
- ② 浸水可能確率(浸水可能メッシュとなる確率)を一律に0～1にした場合の各到達パターンの出現確率を求める。
- ③ 各到達パターンの出現確率を合計する。

図-3 到達パターンの例

(上段：到達パターン例，下段：未到達パターン例)

ここで、この確率計算モデルは、浸水の判定方法に加え、以下の前提条件により検討している。

前提①：各メッシュの地盤高の値は、互いの値の影響

を受けておらず、独立している。

前提②：浸水範囲の広がりや、メッシュの地盤高と津波水位の比較のみで判断する。

実際の地形モデルの作成を考慮した場合、作成するメッシュサイズに比べて十分に密度の高い計測データを使用した場合(例えばLIDARデータを元データとして数m以上のメッシュの地形モデルを作成する場合)、TIN(Triangulated Irregular Network)によりメッシュ中央値の値を求めてメッシュ化しているとき、前提①は成立する。

一方、津波氾濫計算を実施した場合、②の前提については、堰上げ効果や計算諸条件の影響が考えられ成立しない。本研究では、これらの影響は無視し、メッシュが分割される直接的な影響のみを議論することとする。

(3) メッシュ地盤高の算出方法の違いによる到達確率の比較

メッシュ地盤高を算定する方法は、使用するデータ密度とそのばらつき、作成メッシュサイズ内のデータ数、データ精度、作成する地形モデルの使用用途などにより様々である。使用する元データが、作成する地形モデルのメッシュサイズに対して十分なデータ密度がある場合、津波遡上計算に用いる地形モデルには、以下の3つの代表的な算定手法があると考えられる。

①中央値法

メッシュ中央点の地盤高の値を求め、メッシュの地盤高とする方法。最も近い地点のデータを用いる最近隣法、TIN、仮想平面を想定する方法などが用いられている。LIDARにより多量データを処理する場合、処理時間などの問題からTINなどの手法が良く用いられている。

②平均値法

メッシュ内のデータの平均値を求め、メッシュ地盤高とする方法。作成するメッシュより細かいメッシュデータが存在する場合や、メッシュ内に複数の点データが存在する場合に用いることができる。メッシュ内の全データを用いることができるため、データにバラツキが大きいなどに、より偏りの少ない地盤高を求めることができる。

③最小値法

メッシュ内のデータの最低値または最低値に近い値をメッシュ地盤高とする方法。平均値法同様に作成するメッシュより細かいメッシュデータが存在する場合や、メッシュ内に複数の点データが存在する場合に作成できる。津波遡上計算による浸水範囲が過小評価されないように、浸水が広がりやすい地盤高の低め値を用いる方法。

前述した「(2)到達確率の算定」の方法は、上記中央値

法を前提としている。平均値法や最小値法は、中央値法のある地点の地盤高を求める考え方と異なり、利用目的に合わせた統計的なデータ処理の考え方である。このため、元データが存在することが前提であり、使用する元データの精度やデータ数により、求められる地盤高の値が変わる。本研究では、元データはそれぞれが独立し、正規分布することを前提に、使用したデータ数による到達確率の変化を算定した。これは、津波遡上計算の地形モデル作成で考えると、より詳細なメッシュ分割のデータから、大きなサイズのメッシュデータを作成する方法について、影響を評価することと同義となる。

平均値法は、浸水可能確率に対して正規分布する元データ群を仮定し、そこから n 個のデータを抽出し、それらの平均値が浸水可能メッシュとなる確率として求めた。

同様に、最小値法は、浸水可能確率に対して正規分布する元データ抽出した n 個のサンプルの二項分布として求めた。

3. 結果

(1) 中央値法による地盤高データのメッシュ分割の影響

メッシュ分割が 1×1 の場合は、到達ケースとなるのは、間の1メッシュが浸水可能となる1ケースのみである。この場合、浸水可能確率がそのまま到達確率となる。

図-4に示すように 2×2 メッシュの場合、浸水可能メッシュの出現パターンは16パターンとなる。このうち到達パターンは7パターンとなり、到達しない9パターンより少なくなっている。さらにメッシュ分割を 3×3 , 4×4 と進めると、全パターン数/到達パターン数はそれぞれ $197/512$, $22, 193/65, 536$ となり、全パターンに対する到達パターンの割合は、メッシュ分割を進めるほど減少していくことが確かめられた。

この傾向は、全分布パターンの出現する確率が同じ場合、すなわち各メッシュの浸水可能確率が0.5の場合、メッシュを細かく分割するほど到達確率は減少することを示している。

このことを津波遡上計算にあてはめると、氾濫水の水位とメッシュの地盤高がほぼ同じになるエリアにおいては、メッシュを細かく分割するほど氾濫水は広がりやすい傾向があることを示している。

次に各メッシュの浸水可能確率を一律に0~1まで変化させたときの到達確率の変化を、メッシュ分割 $1 \times 1 \sim 5 \times 5$ で計算した結果を図-5に示す。

この結果、到達確率は浸水可能確率0.618...を境界として傾向が異なることが示された。浸水可能確率が0.618...より低い場合、メッシュ分割が大きいほど到達確率は低くなる。また、浸水可能確率が0.618...より高

図-4 氾濫水の到達パターン (2×2メッシュ分割)

図-5 全メッシュデータ浸水可能確率-到達確率(中央値法)

い場合、メッシュ分割が大きいほど到達確率は高くなる。このことは、津波遡上計算においては、以下のことを示している。

- ① メッシュ分割を進めるほど、浸水可能なメッシュが多いエリア、すなわち津波水位より地盤高の低いエリアでは、浸水範囲は広がりやすくなる。また、浸水可能なメッシュが少ないエリア (津波水位より地盤高が高いエリア) では、メッシュ分割を進めるほど浸水範囲は広がりにくくなる。
- ② ①の傾向の分岐点は浸水可能確率が0.5より大きな0.618... (黄金比) となっている。このため、メッシュ分割を進めるほど、すなわち、より小さいサイズで津波遡上計算を行うほど、全体的な傾向として浸水範囲は小さくなる。

(2) メッシュ地盤高の算出方法の違い

図-6、図-7に平均値法および最小値法を用いて、メッシュ地盤高を算出した場合の、元データの浸水可能確率に対する到達確率を示す。

図-6 元データ浸水可能確率-到達確率（平均値法）

図-7 元データ浸水可能確率-到達確率（最小値法）

この結果、平均値法では到達確率は浸水可能確率0.5を境界として、浸水可能確率が低い場合、使用データ数が多いほど到達確率は低くなり、また、浸水可能確率が高い場合、使用データ数が多いほど到達確率は高くなる。このことは、実際の津波遡上計算では、使用データを多くするほど、浸水可能なメッシュが多いエリア（津波水位より地盤高の低いエリア）では、浸水範囲は広がりやすく、浸水可能なメッシュが少ないエリア（津波水位より地盤高の高いエリア）では、浸水範囲は広がりにくくなることを示している。

また、最小値法では、到達確率は全ての浸水可能確率で、使用データ数が多いほど到達確率は高くなる。これは、浸水可能確率が0でない以上、独立した元データ数を増加させるほど到達確率が高くなるためであり、当然の傾向である。元データの浸水可能確率が0.1でも、

25個のデータを用いれば到達確率は0.9以上と高くなり、元データのばらつきが大きい場合、浸水範囲はその分広がりがやすくなる。

4. 実地形での津波遡上計算結果での検証

これまでの検討で得られたメッシュ分割および地盤高の算出方法による到達確率の変化傾向について、実地形を用いた津波遡上計算にて検証を行った。

村嶋ら（2006）による、LIDAR データから作成した地形モデルを用い、表-1に示す TIN による中央値法、平均値法、最低値法による地形モデルをそれぞれ作成し、津波遡上計算を行い、浸水範囲を比較した（図-8）。

津波遡上計算は Staggered 格子を用いた Leap-frog 差分法による非線形長波理論で行った（詳細は村嶋ら；2006を参照）。

この結果、5m 中央値法と20m の各算定手法を比較すると、メッシュ分割を進めた5m 中央値法が最も浸水範囲が小さくなっている。遡上距離の差をみると、遡上端の地形勾配が1:10以上になるような A エリア付近では、浸水範囲に差は見られない。これは、データのばらつきや地盤高作成手法の差よりも、メッシュ間の地盤高の差が大きいため、当然の結果となっている。一方、地形勾配が約1/150（標準偏差0.6m）の B エリア付近では、遡上距離に60m 程度の差がでている。これは約0.4m の地盤高の差にあたり、図-5に示した1×1から4×4へのメッシュ分割による到達確率の減少を、標準偏差から地盤高に置き換えて考えるとほぼ妥当な値となる。

また、20m のメッシュサイズで中央値法、平均値法、最小値法を比較すると、前述の断面 A 付近において遡上距離の中央値法と平均値法では差はほとんどなく、最小値法と他の方法では約40m 最小値法が長くなっている。この傾向は、図-5、図-6、図-7の到達確率の差で見られた傾向と一致するが、最小値法と他の方法の差は図-7で想定される影響より小さくなっている。

5. 考察

以上の検討の結果、中央値法でのメッシュ分割では以下の2点の傾向が示された。

- ① メッシュ分割を進めるほど、浸水確率が高いエリア＝浸水可能なメッシュ（津波水位＞地盤高）が多いエリアほど浸水範囲は広がりがやすく、浸水確率が低い＝浸水可能でないメッシュ（津波水位＜地盤高）が少ないエリアほど浸水範囲は広がりにくくなる。これは、メッシュ分割を進めるほど、浸水範囲の境界は明確になり、地盤高データの偏差（地盤の凹凸）の影響を受けにくいことを示している。

表-1 津波遡上計算ケース

計算 ケース	メッシュ サイズ	地盤高の 算定手法	元データ
1	5m	中央値法 (TIN)	LIDAR データ
2	20m	中央値法 (TIN)	LIDAR データ
3	20m	平均値法 16 データの 平均値	ケース 1 の 5m メッシュ地形モ デルを元データ として使用
4	20m	最小値法 16 データの 最小値	ケース 1 の 5m メッシュ地形モ デルを元データ として使用

左上：計算ケース 1 (5m メッシュサイズ, 中央値法)
 左下：計算ケース 2 (20m メッシュサイズ, 中央値法)
 右上：計算ケース 3 (20m メッシュサイズ, 平均値法)
 右下：計算ケース 4 (20m メッシュサイズ, 最小値法)

図-8 地形モデルによる浸水範囲

- ② メッシュ分割による広がりやすさの分岐点は浸水確率 $0.618\cdots$ (黄金比) (>0.5) となっている。このことはメッシュ分割を進めるほど、全体的な傾向として浸水範囲は狭くなること (メッシュ分割が粗いほど浸水範囲が広くなること) を示している。

また、使用データ数が多いほど、平均値法では浸水範囲が明確に、最小値法では使用するデータのばらつきが大きいくほど、浸水範囲が大きくなる。

実地形での津波遡上計算の結果、メッシュ分割および地盤高の算出方法の影響は浸水範囲の違いとして確認できた。中央値法のメッシュ分割の影響の程度は、確率計算モデルの結果と地形勾配、地形データの標準偏差を用いることで説明できた。

このことは、使用する地形データにより、メッシュサイズおよび地盤高の算出方法の浸水範囲への影響の程度を事前に検討できる可能性を示している。

今後、このところをより明確に実証するため、より地形勾配の少ないエリアでの検証を進めていく必要がある。

参 考 文 献

- 今村文彦・藤原誠・進藤一弥・市村強 (2004) : 臨海都市域に
 来襲する津波の統合シミュレーション開発, 海岸工学論文
 集, 第51巻, pp. 291-295.
 岩手県 (2004) : 岩手県地震・津波シミュレーション及び被害
 想定調査に関する報告書 (概要版), 164 p.
 村嶋陽一・今村文彦・竹内仁・鈴木崇之・吉田健一・山崎正幸・
 松田健也 (2006) : 津波浸水予測における航空機搭載型レー
 ザーデータの適応性, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1336-
 1340.