

確率過程を導入した津波遡上の不確実性評価  
Uncertainty Assessment of Tsunami Runup by Introducing Stochastic Processes

○久我知弘・宮下卓也・志村智也・森信人  
○Tomohiro KUGA, Takuya MIYASHITA, Tomoya SHIMURA, Nobuhito MORI

This study aimed to quantify the propagation of small tsunami disturbances from offshore to the coast. One-dimensional tsunami run-up simulations were performed on a simple topography consisting of a flat bottom connected to a constant slope. One hundred patterns of incident solitary or sinusoidal waves with stochastic disturbances were generated using the Wiener process. Results showed that the standard deviation of coastal tsunami height was larger on milder seabed slopes as the slope distance gets longer. Notably, the variability amplification reached approximately 6.2 times for a 1/100 gradient. Furthermore, no significant differences in the degree of variability were observed between solitary and sinusoidal waves.

## 1. はじめに

我が国では地理的特徴から海溝軸・トラフ軸付近で発生する大地震とそれに伴う津波の発生が懸念されている。将来的に発生する地震の発生位置や規模を推定することは困難であることから、近年では考えられるあらゆる地震津波のシナリオを考慮し、その全てのシミュレーション結果を統合して津波ハザード・リスクを評価することが一般的となりつつある。一方、津波イベント自体の差異のみならず、イベント発生後の伝播過程においても微小な外力による擾乱や、海底地形の起伏によって波形が変動しうる。津波波形のばらつきの大きさが沿岸域の波高や遡上高にどの程度影響を与えるかは十分に定量化はされていない。このような伝播過程の不確実性は、例えば津波のリアルタイム予測時に沿岸域での津波高の予測幅を科学的に推定する上で重要な指標となりうる。

以上の背景を踏まえて、本研究では津波の小さなばらつきが沖合で発生する状況を想定し、この津波の変動が沿岸部でどの程度拡大するかを定量化することを目的とする。

簡単のため、水平な地形と一定勾配の斜面を接続した地形で1次元津波遡上計算を実施し、沖合の境界で与えた津波のばらつきと沿岸域のばらつきの大きさを評価する。

## 2. 研究手法

### (1) 海底地形条件

図-1 に本研究の津波遡上計算に用いる海底地

形条件の概略を示す。図左の平坦な海底地形から津波を入射し、右端まで到達させる。一様水深部の水深は100 m、陸域部分を海拔10 mで設定し、1/10から1/100までの5パターンの勾配で地形を作成し、地形条件による津波波高のばらつきの差異を評価する。

### (2) 入射波条件

本研究では、確率過程の一種であるWiener過程によって入射波の時系列的なばらつきを表現した。Wiener過程とは、ブラウン運動のような出鱈目な粒子の運動を解析するために生まれた確率理論である。次式はWiener過程による変動を導入した入射波である。

$$ds = b(x)dx + \sigma dW_x \quad (1)$$

ここで、 $b(x)$ ：ドリフト項（系の平均的な方向性を表す項）、 $\sigma$ ：拡散項（系のランダムな変化率を表す項）、 $dW_x$ ：Wiener過程の微小増分項である。

本研究では、ドリフト項に相当する基本の入射波形に孤立波と正弦波を採用し、Wiener過程による確率的ゆらぎを与えた波形を多数作成する。ゆらぎのない孤立波は有効長が8000 mであり、4200 m地点で、最大波高が1 mになるようにした。ゆらぎのない正弦波は波長が8000 m、振幅が0.5 mで、第一波のみとした。ゆらぎのある波形については、微小なゆらぎを200 m毎に0.01 m（波高に対して1 %）与え続けた波形を100パターン生成した。図-2に生成した入射波形を示す。

### (3) 津波遡上計算

津波遡上計算にはオープンソースソフトウェアである GeoClaw (Geophysical Conservation Law model) を用いた。GeoClaw の基礎方程式は非線形長波方程式であり、分散性の考慮・非考慮の選択が可能である。海底面摩擦を Manning の粗度係数で表現し、 $n = 0.025 \text{ s/m}^{1/3}$  とした。

計算条件として、時間分解能は初期値を 0.1 秒とし、計算が始まると、 $\text{CFL} = 0.25$  を満たすように自動的に更新される設定にした。計算対象時間は 1000 秒間とした。また空間分解能は 1.0 m とした。

生成した 100 パターンの入射波形すべてについて上記の条件による津波遡上計算を行い、津波のばらつきの拡大を地形条件ごとに評価した。ばらつきの大きさは、入射波形と遡上端における最大波高の標準偏差の比（変動率と定義）を用いて評価し、地形条件ごとに比較を行った。

### 3. 計算モデルの妥当性検証

本研究で用いたモデルの妥当性を検証するため Synolakis (1987) の理論解との比較を行った。遡上終端における波の時系列変化に注目すると急勾配である 1/20 や 1/30 等において、良好な一致を示した。なお勾配 1/70 以降の緩勾配では非碎波条件を逸脱してしまい、理論解の条件から外れてしまうため、計算解と理論解に乖離が見られた。

### 4. 結果

勾配の異なる各地形条件における入射波と遡上端の波高の標準偏差比（変動率）を図-3 に示す。緩勾配の方が最大波高のばらつきが大きいことがわかる。特に、最も勾配が緩やかな 1/100 の場合、津波の遡上前後で標準偏差が約 6.2 倍となっている。これは、勾配が緩い条件では遡上距離が長くなることに起因すると考えられる。また、津波のグリーンの法則の通り、線形理論では沖合と沿岸の津波波高の比は水深比で定まり、伝播距離には依存しない。したがって、線形理論の上では図-3 の波高のばらつきの比はいずれの地形条件においても 1 となる。さらに最もばらつきの小さい 1/10 勾配のケースにおいても、遡上端で入射波のばらつきが約 2.3 倍にまで拡大しており、この増分が非線形効果といえる。また孤立波と正弦波の波形の違いによるばらつきの拡大比率に大きな差異は見られなかった。

### 5. おわりに

本研究では、Wiener 過程による確率的ゆらぎを継続的に与えた 100 パターンの孤立波と正弦波を入射波とし、5 ケースの勾配をもつ地形条件で 1 次元津波遡計算を行った。その結果、勾配が緩やかになるにつれ、津波波高の微小なばらつきが遡上後に拡大される傾向が得られた。今後、ゆらぎの与え方やモデル波形の差異によるゆらぎ伝播の影響を定量化する必要がある。

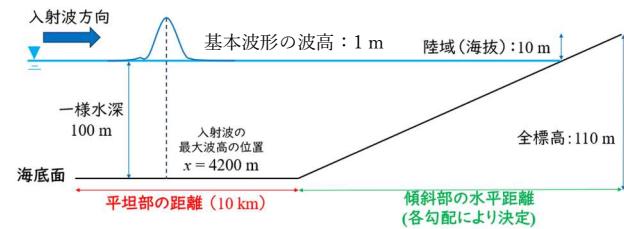


図-1 津波遡上計算における海底地形条件の概略

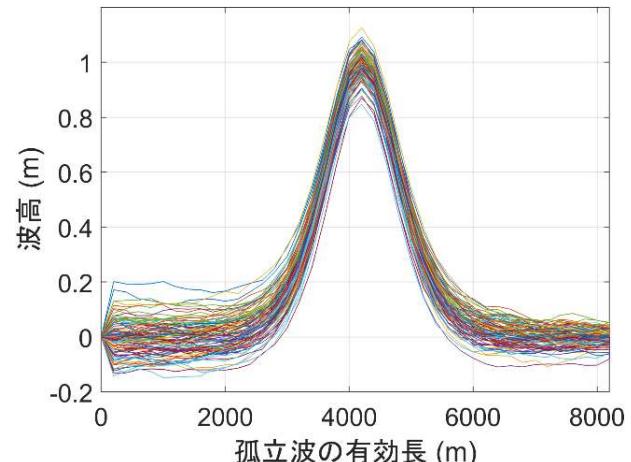


図-2 孤立波に確率的ゆらぎを与えた 100 パターンの入射波

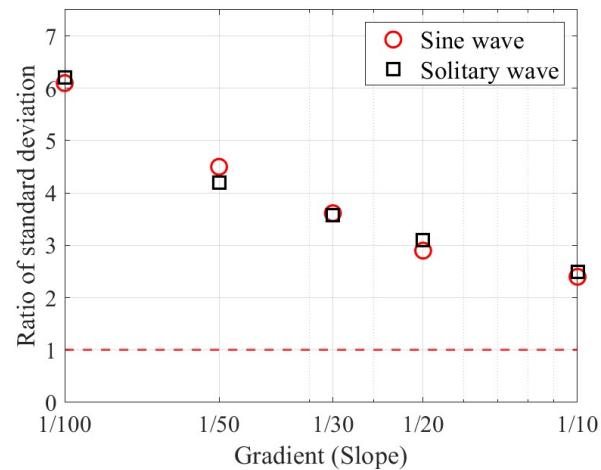


図-3 入射波高の標準偏差で無次元化した遡上端での最大波高のばらつき（孤立波と正弦波）