

## 非線形性を考慮した津波シミュレータの開発と 4次元メッシュモデルによる津波の時空間表現

北海道大学大学院情報科学研究科 ○箱石 開, 小野里 雅彦, 田中 文基

### 要旨

非線形長波理論式を支配方程式として用いることにより, 津波の運動の非線形成分を考慮した伝播計算が可能な津波シミュレータの作成を行った. さらに, シミュレーション結果として得られた津波の水位の時系列データを, 時間的に連続なモデルである4次元メッシュモデルで表現し, その断面抽出結果である3次元形状について考察することで, 津波の時空間的な挙動を把握することができた.

### 1 はじめに

将来高い確率で発生すると予測されている南海トラフ大地震では, 津波による死者が最大で約23万人にも上るといふ予測がなされている[1]. 一般に, 津波被害の予測などの解析は, 津波シミュレーションを行うことで得られる津波の時系列水位データを用いて行われる. しかし, 時系列水位データは時間に対して離散的であるため, 時間に対して連続的な解析を行うことが困難である. この点に着目し, 駒木根による先行研究では津波シミュレータの作成および津波挙動の4次元メッシュモデルの生成を行った[2]. 津波の水位変化を4次元メッシュモデルで表現することで, 津波を時間に対して連続的な形状として扱い, 時間変化を含む被害判定を幾何学的な処理として簡単に扱うことが可能である.

しかしながら, 先行研究における津波シミュレータは津波の運動における非線形成分を考慮しておらず, 伝播計算の精度の低さが課題となっていた. 以上のことから, 本研究では津波の運動における非線形成分を考慮可能な非線形長波理論式を用いたシミュレータの作成を行い, その計算結果から津波の4次元メッシュモデルの生成を行う.

### 2 津波シミュレータの作成と結果

#### 2.1 入力データおよび計算格子の設定

津波は波長が水深よりも非常に大きく, 長波に分類される. さらに, 短波長成分を含まないと仮定すると, 津波の挙動は長波理論式によって表すことができる. この長波理論式中の非線形項は, 水深の深い領域では無視できるほど小さくなる. 非線形項を無視して線形化した式を線形長波理論式と呼ぶ. 線形長波理論式は(1)式の連続の式に加えて, (2), (3)式の運動の式の3式から成る. ここで,  $x, y$ は水平座標,  $t$ は時間,  $\eta$ は静水面からの水位上昇量,  $D$ は全水深 (= 静水深 +  $\eta$ ),  $g$ は重力加速度,  $M, N$ は $x$ 方向および $y$ 方向の流量フラックス (= 各方向の流量 × 水深) を表す.

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

一方, 線形長波理論式の運動の式に非線形項を追加したものを非線形長波理論式と呼び, (1)式の連続の式, (4), (5)

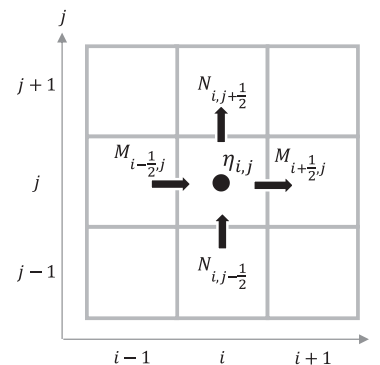


図1 Staggerd 格子

式の運動の式の3式から成る. 格子配置は図1に示すStaggerd格子とし, 水位を格子の中心に, 流量を格子境界上に配置する. 前述の長波理論式を leap-frog 法を用いて差分化し, 水位と流量の値を逐次計算する.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^3} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^3} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (5)$$

先行研究のシミュレータでは, 浅海域においても線形長波理論式を使用していたため, 浅海域の津波の運動における非線形項を考慮したシミュレーションを行うことができていなかった. そのため, 本研究では非線形長波理論式を用いた伝播計算法を実装し, 水深90m以上の外洋部と水深90m未満の沿岸部とで線形および非線形長波理論式を使い分けられるようにした.

#### 2.2 入力データおよび計算格子の設定

作成した津波シミュレータへ入力するデータは, 南海トラフの巨大地震モデル検討会[3]から入手した地形・粗度データおよび断層すべりによる水位加算量データとした. 地形・粗度データは陸地および沿岸に近い領域では解像度の高いデータ, 外洋部では解像度の低いデータが用意されており, 伝播計算における計算格子もデータの解像度に応じて設定した. また, ネスティングを行うために, 異なる解像度を持つ領域の接続処理として後藤の方法[4]を実装した.

#### 2.3 シミュレーション対象地域および断層モデル

本報におけるシミュレーションの対象地域は, 南海トラフ大地震による津波被害が予想されている三重県志摩市阿児町国府とした. この地域は1854年に発生した安政東海地

震の際に 8~10m の津波に襲われており [5], 将来南海トラフ大地震が発生した際にも津波による被害が予想されている地域である。また, 断層すべりによる水位加算量データは, 駿河湾から紀伊半島沖に大すべり域を設定した場合のデータを使用した。

## 2.4 シミュレーション結果

シミュレーション時間を地震発生後 0 秒から 3000 秒 (50 分) まで, 計算の際の時間刻み幅は 0.1[s] としてシミュレーションを行った。なお, グラフィック表示の際には, 水位の変化を強調して視認性を高めるために, 水位の変化量を 10 倍にして描画を行った。地震発生から経過した時間を  $t[s]$  としたときの, 阿児町国府沿岸部の様子を以下の図 2(a)~(f) に示す。図 2(c)( $t = 990$ ) から, 陸地への遡上範囲が大きくなっており, 図 2(d)( $t = 1710$ ) では, 図中の中心部でさらに遡上範囲が広がっている。また, 図 2(e)( $t = 2460$ ) では, 津波が海岸から沖合に向かって進行する引き波の挙動を示していることが確認できる。なお, 図 2(f)( $t = 2940$ ) から確認できる通り, 図 2(d)( $t = 1710$ ) 中で中心付近に遡上した津波は地震発生から約 3000 秒後でも残っているという結果となった。

## 3 4次元メッシュモデルの生成

津波シミュレータの計算結果として得られた, 10m メッシュ領域における水位と地形の時系列 Zmap データを元に水位と地形の 4 次元メッシュモデルを生成した。モデルの生成には, 本研究グループの小野里が開発した 4DZmapStacker を使用した。なお, 生成した水位と地形の 4 次元メッシュモデルの頂点数は 4,780,040, 四面体数は 27,846,468 となった。

生成した水位と地形の 4 次元メッシュモデルを  $t=1710.0$  および  $x=0.0$  (南北方向) の超平面で切断したときの断面抽出結果をそれぞれ図 3, 図 4 に示す。ここで,  $x=0.0$  の超平面は図 3 上の点線部分に対応している。図 3 は  $t = 1710[s]$  の断面形状であり, 地震発生から 1710[s] 経過後の津波の様子が確認できる。一方, 図 4 は  $x = 0$  (南北方向) の断面形状を表しており, 図 3 中に点線で示した断面の時間変化が一つの形状として表現されている。また, 図 4 中に点線で囲った部分では, 時間が進行するにつれ  $y$  軸方向に津波の幅が広がり遡上範囲が拡大しているが, さらに時間が経過すると  $y$  軸方向の津波の幅が小さくなり, 津波が次第に引いていくことが確認できる。

## 4 結論

本研究では, 沿岸部にて非線形長波理論式を使用することで, 津波の運動の非線形成分を考慮した伝播計算が可能な津波シミュレータを作成した。また, シミュレータから水位と地形の時系列 Zmap データを出力し, その 4 次元メッシュモデルを生成することで, 時間変化する津波の形状を時間に対して連続的な 4 次元形状として表現することができた。

今後の展望としては, 生成した 4 次元メッシュモデルを用いた応用的な解析や, 地形などの時間変化が少ない 4 次元メッシュモデルの四面体数の削減などが考えられる。

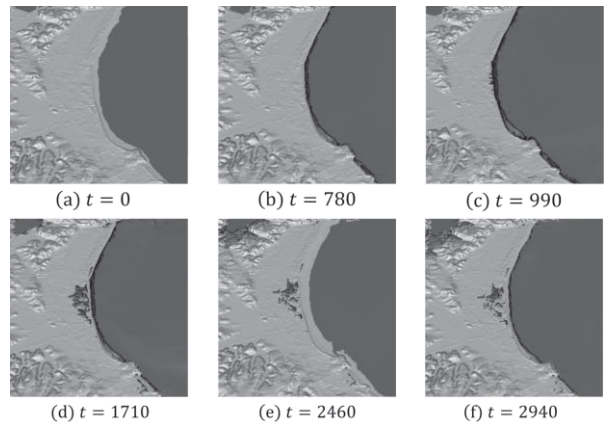


図 2 津波シミュレーション結果

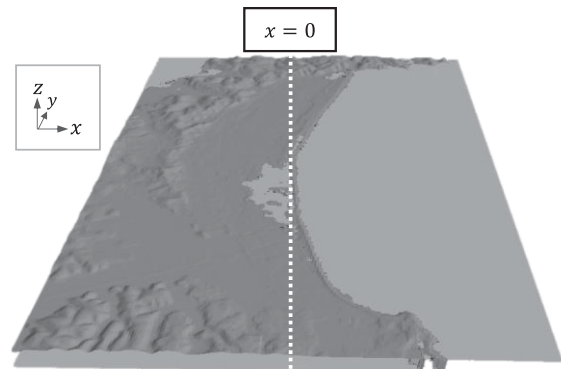


図 3  $t$  軸に対する断面抽出 ( $t = 1710.0$ )

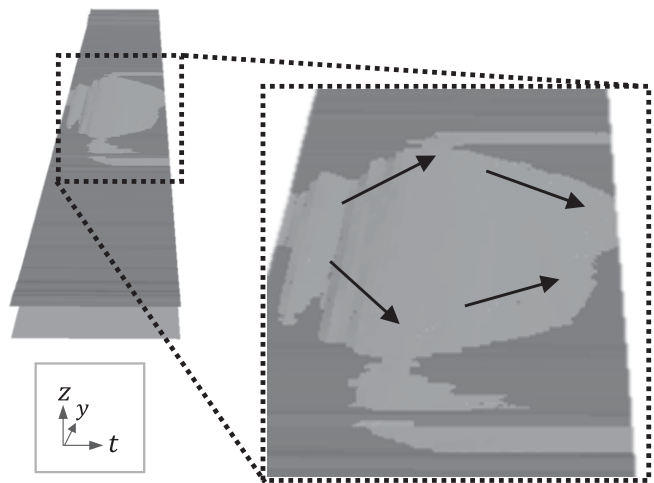


図 4  $x$  軸に対する断面抽出 ( $x = 0.0$ , 南北方向)

## 参考文献

- [1] 内閣府, 南海トラフの巨大地震による津波高・浸水域等 (第二次報告) 及び 被害想定 (第一次報告) について, [http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku\\_wg/pdf/shiryo.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/shiryo.pdf)
- [2] 駒木根徳友, 4 次元メッシュモデルによる津波伝播現象の表現, 2013 年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, pp.67-68, 2013.
- [3] 内閣府, 南海トラフの巨大地震モデル検討会において検討された震度分布・浸水域等に係るデータ提供について, [http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/data\\_teikyuu.htm](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/data_teikyuu.htm)
- [4] 後藤智明, 小川由信, Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科, 1982.
- [5] 行谷祐一, 都司嘉宣, 宝永 (1707)・安政東海 (1854) 地震津波の三重県における詳細津波浸水高分布, 東京大学地震研究所, 歴史地震研究会誌「歴史地震」, pp33-56, 2005.