

## 4次元メッシュモデルによる津波伝播現象の表現

北海道大学 ○駒木根 徳友, 小野里 雅彦, 田中 文基

### 要旨

複雑な時間変化を示す津波の伝播現象を4次元メッシュモデリングによって4次元空間の静的で連続な形状として明示的に表現することにより、津波の伝播現象の特徴を容易に掴めることが可能となる。4次元メッシュモデル取得にあたって、津波の陸域への遡上などの境界条件を考慮した上で津波の伝播を計算し、時系列ボクセルデータの出力が可能な津波伝播シミュレーションシステムの開発を行う。

### 1 本研究の目的

近年、対象の変形や運動といった3次元形状の時間変化を扱う問題は多く存在する。例えば、津波の伝播現象は海底地形や遡上する陸域の地形により複雑な挙動を示すが[1]、防災のためのハザードマップの作成にはその時間変化を記述するモデルが必要になる。

しかし、これまでのモデル表現では3次元形状の動的な変化を時間軸方向の離散的な値として表現している。このため、津波の形状変化を連続的に表現することが難しく、その途中変化の解析が困難という課題が存在していた。そこで本研究では、津波の伝播現象へ4次元メッシュモデリングを適用し、津波の3次元形状を明示的に表現することを目的とする。

### 2 津波伝播現象への4次元メッシュモデリング[2]の適用

本研究において用いる4次元空間とは、3次元空間と時間により定まる4次元ユークリッド空間 $R^4$ である。

4次元空間において、最も単純な多面体状の胞である四面体により、4次元形状の境界を構成するモデルを4次元メッシュモデルと定義する。各四面体は4次元空間における超平面上に存在し、その超平面により4次元空間は外部、境界、内部に分けられる。

4次元メッシュモデルの特徴は、運動や変形により空間配置と形状を変える対象を4次元形状モデリングの枠組みで統一的に記述できることにある。これによって、従来まで時間の表現手法やシミュレーション手法などに依存していた動的な対象表現・操作を、すべて幾何の概念で形状モデル表現・操作として取り扱うことができる。

この4次元メッシュモデルを生成するまでの流れを以下に示す。(図1)

- (1) 地形データと津波初期波形を入力とし、線形長波理論式と図2, 3に示す leap-frog 法による津波伝播シミュレーションの実装を行う。
- (2) シミュレーションで取得した時間毎の水位データから時系列ボクセルデータを作成する。
- (3) 4D-Marching Cubes 法[2]により、時系列ボクセルデータから4次元メッシュモデルを生成する。

以上の流れで4次元メッシュモデルを生成する。

### 3 津波伝播シミュレーションシステムの実装

4次元メッシュモデル生成のために、津波の伝播を計算する式として線形長波理論式を用い、その解を求めるために差分法の一つである leap-frog 法を用いる津波伝播シミュレーションの実装を行った。計算式を式(1)~(3)に示す。なお、 $\eta$ は水位、 $M$ ,  $N$ は $x$ ,  $y$ 方向の流量、 $h$ は水深、 $g$ は

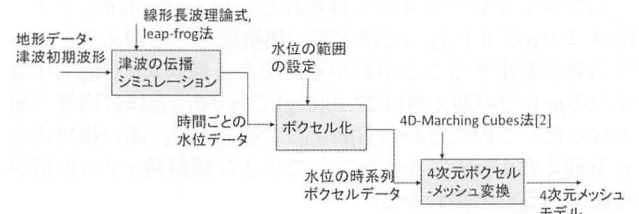


図1 津波の水位変動の4次元メッシュモデル取得の流れ

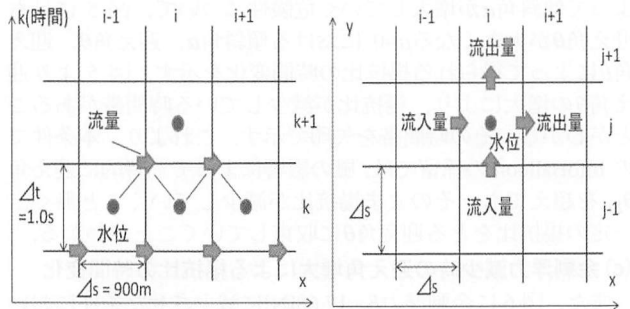


図2 流量計算

図3 水位計算

重力加速度、 $i, j$ は格子番号、 $\Delta t$ と $\Delta s$ は時間と空間の差分量を表す。

$$\eta_{i,j}^{k+1/2} = \eta_{i,j}^{k-1/2} - \frac{\Delta t}{\Delta s} (M_{i+1/2,j}^k - M_{i-1/2,j}^k - N_{i,j+1/2}^k - N_{i,j-1/2}^k) \quad (1)$$

$$M_{i-1/2,j}^{k+1} = M_{i-1/2,j}^k - gh_{i-1/2,j} \frac{\Delta t}{\Delta s} (\eta_{i,j}^{k+1/2} - \eta_{i-1,j}^{k+1/2}) \quad (2)$$

$$N_{i,j-1/2}^{k+1} = N_{i,j-1/2}^k - gh_{i,j-1/2} \frac{\Delta t}{\Delta s} (\eta_{i,j}^{k+1/2} - \eta_{i,j-1}^{k+1/2}) \quad (3)$$

図2のように式(2), (3)と津波初期波形から $x$ ,  $y$ 方向の流量を求めることができ、図3のように求めた流量から次の時間ステップでの水位を求めることができる。この水位と流量を1/2格子ずらして行う計算を繰り返すことにより、津波の伝播現象をシミュレートすることができる。

また、本研究で実装したシステムでは津波の陸上遡上を考慮しており、さらに図4で示した計算領域境界で吸収領域の設定を行い、シミュレーションの正確性を向上させている。波の吸収領域では式(4)によって計算領域境界に向かって津波を減衰させていく。式(4)中の $r$ は吸収領域内の各格子とそれに最も近い内側境界との距離であり、計算領域の4隅では $x, y$ 各軸方向から遠い方の距離を用いた。また、式(4)の定数は0.015とし、20格子分を吸収領域として計算の調節を行った。

$$\eta_{i,j}^{k+1/2} = \eta_{i,j}^{k+1/2} \cdot e^{-(0.015r)^2} \quad (4)$$

この式(4)により計算領域内に津波が反射せず、模擬的に津波を計算領域外に透過させることが可能となる。

シミュレーションにおける計算領域は日本の東北沖（東経 140.7-144.7 度，北緯 35.5-41.5 度）とし，入力とする地形データは，SATELLITE GEODECY[3]から入手した 1800m×1800m の直交格子データに対し隣接する格子点の平均をとることによる格子点の補間を行った 900m×900m の直交格子データとした．津波初期波形は，+6.0m の水位を東経 142.8 度北緯 37.3 度を中心に南北 194km 東西 88km の範囲で与え，計算時間間隔は 1[s]とした．

#### 4 時系列ボクセルデータの取得

シミュレーションにより取得された水位データから，時系列ボクセルデータを作成する．ボクセル化する範囲は，湾であるため津波の特性が掴みやすい図 4 で示した描画領域とし，ボクセル空間サイズは 128×128×64， $x$ ， $y$  方向の一つのボクセルサイズを 900m とした． $z$  方向は，本研究では計算メモリの容量とデータサイズの関係から範囲を -48m～+48m とし， $z$  方向のボクセル幅を 1.5m とした．なお，陸域の標高値は津波の挙動をわかりやすくするため全て 0m として表現している．

このボクセルデータを津波の初期波形を与えてから描画領域に津波が到達し始める 40 分後から 4 分刻みで 140 分後まで取得し，4 次元メッシュモデルを生成した．

#### 5 4次元形状の断面抽出

4D-Marching Cubes 法[2]により時系列ボクセルデータから生成した 4 次元メッシュモデルに対し，各軸に垂直な超平面による断面抽出を行った．図 5 (a)～(f) は時間軸に垂直な超平面による断面抽出結果である．また，図 6 (a)～(b) は  $x$  軸， $y$  軸にそれぞれ垂直な超平面による断面抽出結果である．

図 5 に示す  $t$  軸に対する断面抽出では，各時間における津波の 3 次元形状が表現されていることが確認でき，津波が 4 次元形状として表現できていることを示している．

図 6 に示す  $x$  軸， $y$  軸に対する断面抽出では，津波が沿岸部に到達する時間，陸へ遡上している時の津波の高さ，津波が複数回押し寄せる時の高さの推移といった情報が，容易に得ることが可能になることを示している．

#### 6 結論

本研究では，4 次元メッシュモデル取得のために，地形データと津波初期波形を入力，時系列ボクセルデータを出力とする津波伝播シミュレーションの実装を行った．また，生成した津波伝播の 4 次元メッシュモデルの断面抽出結果からは，従来の時間軸にそった 3 次元形状では表現することが難しい津波の時間変化を，明示的に記述可能であることを確認した．今後の課題としては，生成した 4 次元メッシュモデルの解析手法の開発，時系列ボクセルデータを介さない 4 次元メッシュモデルの生成，津波伝播シミュレーションの実装内容の改良などが挙げられる．

#### [参考文献]

- [1] 首藤伸夫，佐竹健治，松富英夫，今村文彦，越村俊一，津波の事典，朝倉書店 (2007)
- [2] 川岸良次，サイバーワールドのための 4 次元メッシュモデリングシステムの開発，北海道大学 大学院情報科学研究科 修士論文集(2010)．
- [3] SATELLITE GEODECY  
[http://topex.ucsd.edu/marine\\_topo/](http://topex.ucsd.edu/marine_topo/)

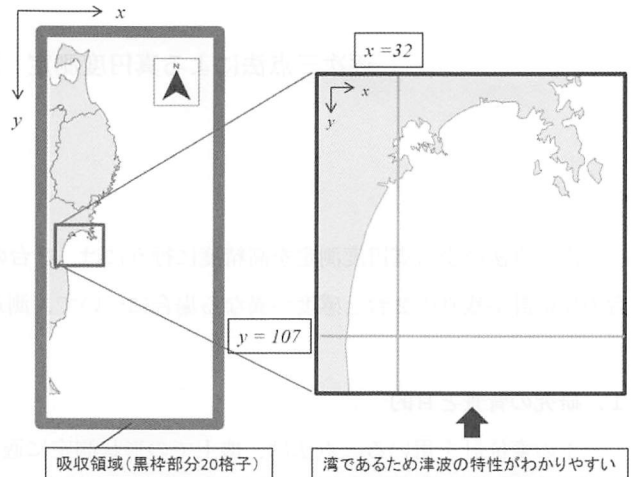


図 4 左：計算領域と吸収領域 右：描画領域  
(領域内の波の振幅を減衰)

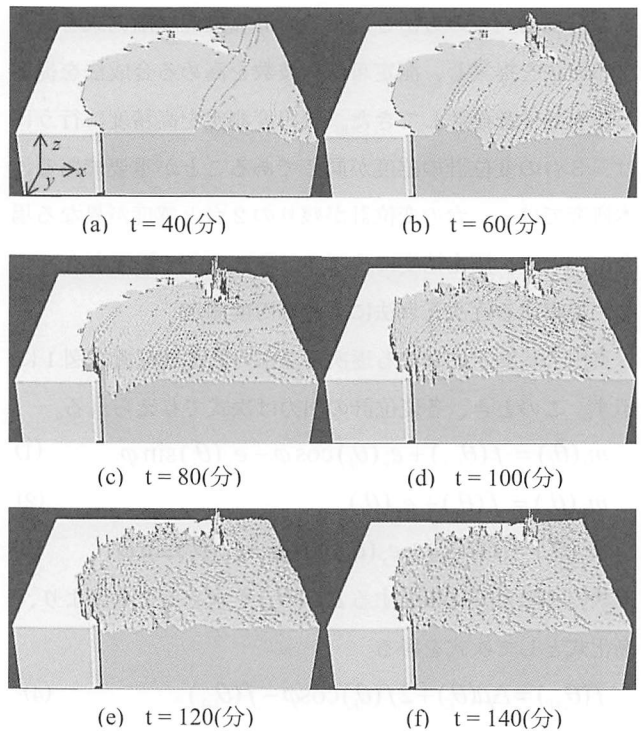


図 5  $t$  軸に垂直な超平面による断面抽出結果

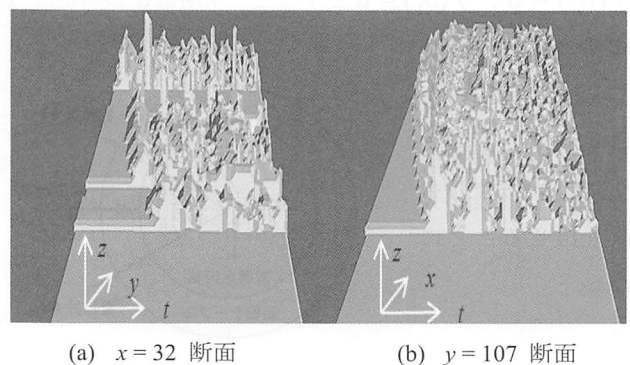


図 6  $x$ ， $y$  各軸にそれぞれ垂直な超平面による断面抽出結果  
(陸域に遡上する津波を形状で表現)