

港内における津波解析モデルに関する研究

鳥取大学大学院 正会員 松原雄平

鳥取大学大学院 正会員 黒岩正光

日本ミクニヤ株式会社 正会員 市村康

鳥取大学大学院 正会員 ○中山 仁成

1. はじめに

わが国は世界でも有数の地震多発地帯であるが、地震に伴う津波の発生件数は非常に多く、明らかになっているものだけでも数十回にわたる津波の来襲を受けており、世界有数の津波の被災国である。巨大地震の津波により土砂移動による地形変化が発生したことによって、洗掘による港湾施設への被害、土砂の堆積による水深の不足、船舶の利用制限、発電所港湾内の取水口の閉鎖などの被害が懸念されている。そのため、津波の来襲時に港湾内外での砂移動を定量的に予測する手法の重要性が増してきている。ところが、大きな津波は稀にしか発生せず、実際、日本被害津波総覧の中に東北地方太平洋側で津波記録が記載されている事例が 1896 年から 100 年間に 80 回あるが、最大の値が 3m を超えるものはそのうちの 5 回のみである。巨大地震の発生頻度が非常に低いため、過去に津波被害を受けたときと現在とは大きく社会環境が異なっている。そのため、過去の経験だけで被害予測を行うことや対策を議論することは非常に困難である。そこで、被害予測や対策の効果を検証するために数値解析が多用されることになる。本研究では宮城県名取市の閑上漁港を対象とし、東北地方太平洋沖地震津波の港湾内における津波のシミュレーションを行い、再現性を検討することを目的とする。

2. 津波の数値計算

津波は長波に分類され、浅水方程式を連続式と併せて解くことによって、津波の伝播、波高の変化、陸域への遡上などが計算できる。本研究では、次章で示す iRIC ELIMO (International River Interface Cooperative Easy-performable Long-wave Inundation Model) ⁽¹⁾⁽²⁾ によるシミュレーションソフトを用いて外洋（広領域）における津波伝搬を計算し、その結果を用いて対象とする小領域の津波を計算する。小領域においては、平面 2 次元の浅水方程式をリープフロッグ陽形式差分法によって離散化して計算した。⁽³⁾

非線形長波の式（浅水理論）

〔連続の式〕

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

〔運動方程式〕

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0$$

表 1 断層パラメータ

	断層 1	断層 2
緯度 (°)	39.00	37.21
経度 (°)	143.49	142.41
長さ (km)	199	176
幅 (km)	85	82
走向角 (°)	202	201
傾斜角 (°)	18	15
滑り角 (°)	97	81
滑り量 (m)	27.7	5.9

3. 東北地方太平洋沖地震津波のシミュレーション

3.1 シミュレーションの概要

港内における流動計算を行うに当たって、初期条件が必要である。そのために実際に東北地方太平洋沖地震の波形を求めなければならない。そこで iRIC ELIMO を利用する。iRIC ELIMO とは、海底変位情報を入力し、津波の発生から伝達、海岸での発達をシミュレートする計算コードを iRIC 上で実行するものであり、不特定多数のユーザーが任意で設定する津波に対して計算が可能であり将来の多様な防災へ向けた取組を支援するツ

ルである.2011 年東北地方太平洋沖地震津波に対しては,2つの断層の変位からなる矩形断層モデルが国土地理院より報告されている(表 1 参照).海底地盤の変位は場所によって分布を持つので,局所的な変位を反映させ津波計算を行う必要があるが,ELIMO ではこれを単純化し長方形の領域を持つ断層が一様にすべり面上を滑動し変位する矩形断層モデルによって引き起こされる津波を対象として計算を行うものである.これは計算条件の設定において,変位する矩形領域の広さ(Rupture length)と幅(Rupture width),滑り距離(Slip length),滑り角(Slip angle),走向角(Strike angle)と傾斜角(Dip angle)及び矩形断層上端の緯度(Latitude of Fault Top)と経度(Longitude of Fault Top)を断層パラメータ(図-1 参照)として指定することで任意の想定津波を決定できる.このパラメータと図-2に記す範囲の地形データより津波のシミュレーションを行い,関上漁港の沖合上の計算点(図-3 参照)における水位変動の時間的变化を求め,波形を求めることで流動解析の入力波として与えた.

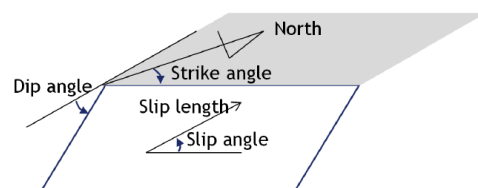


図-1 断層パラメータの概要図

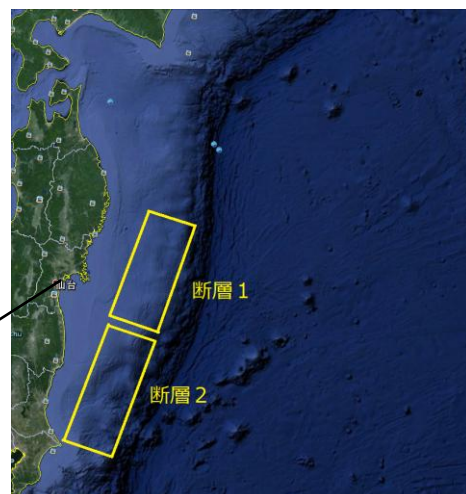


図-2 iRIC での計算領域と断層 1, 断層 2

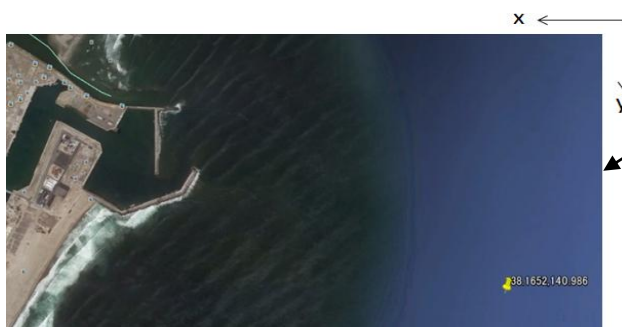


図-3 関上漁港沖合の計算点

3.2 シミュレーション結果

東北地方太平洋沖地震津波発生時から約 15552 秒までシミュレーションを行う. 図-4 は津波発生後から 500 秒経過した際のシミュレーションの結果である. このシミュレーション結果について図-4 上に記された沖合の点における東北地方太平洋沖地震津波の水位変動の時間変化をグラフ化したものが図-5 であり,これが東北地方太平洋沖地震津波の波形である. この波形を流動計算の初期条件として与え流動解析を行う.

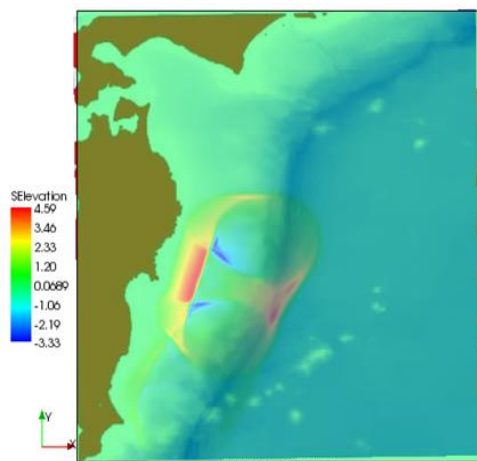


図-4 シミュレーション結果 (500 秒後)

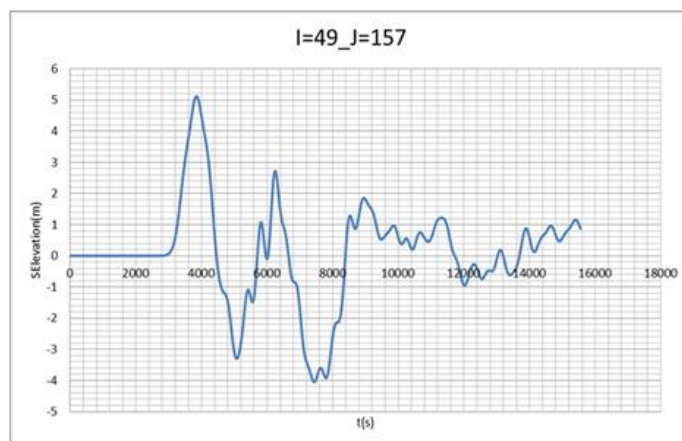


図-5 東北地方太平洋沖地震津波 波形

4. 関上漁港港内における流動解析結果及び考察

浅水理論式をベースとしたリープフロッグ法による差分で東北地方太平洋沖地震津波を入力波として与える際に、図-5の波形について地震津波発生後から関上漁港に津波が来襲するまでの水位変動が現れていない0秒～約2950秒の波形を除去し、関上漁港に津波が来襲してから以降の波形を入力波として与え、流動計算を行った。実際の津波来襲時の関上漁港における航空写真でも循環流が確認されており、流動計算でも循環流が再現されるはずである。狭窄部は流れが速いために土砂の移動量が増加し、水深は大きくなる。また循環流が見られる場所においては、循環流の中心部の土砂が外側へ運搬されるため中心部ほど水深が大きくなり、外側部ほど水深が小さくなるという法則性から、流動解析において土砂の運搬を予測し再現性を検証する。ベクトルの大きさは流速の大きさ、方向は流れの方向を表している。図-6(a)は津波来襲から260秒後の流動計算結果である。新港港内、旧港港内で循環流が再現されている。図-6(b)は津波来襲から650秒後の流動計算結果を表しており、新港入口で引波が確認できる。また、新港港内で時計回りの循環流が再現されており、また狭窄部における流速も大きい。図-6(c)は津波来襲から2600秒後の流動計算結果を表しており、新港入口及び旧港入口で引波が確認できる。また新港港内においても同様に時計回りの循環流が再現されている。図-7は松原らによって行われた深浅測量結果⁽⁴⁾である。新港、旧港入口の狭窄部において水深が大きく、洗掘を確認できる。図-6と比較すると新港、旧港の漁港内における循環流の外側部には堆砂が見られ、水深が小さいことも確認できるため上記の法則性を満足している。狭窄部などの流速が大きい箇所において洗掘が見られ、水深が大きい。以上より、狭窄部における洗掘や漁港内における堆砂は、これらの影響によるものであると考えられる。土砂移動に関する法則性に基づいた予測での比較ではあるが、流動解析結果は比較的に良い精度で再現されている。

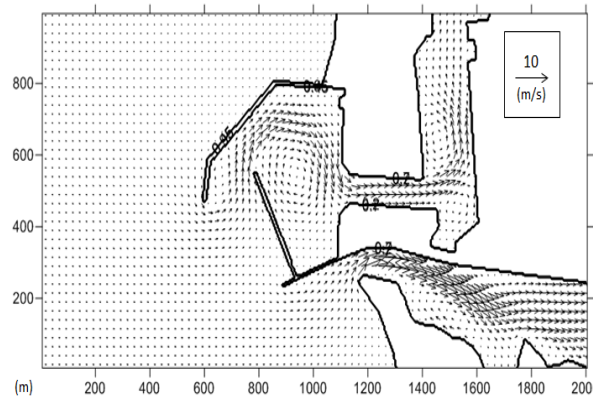


図-6(a) 260 秒後 新港：入波 旧港：入波

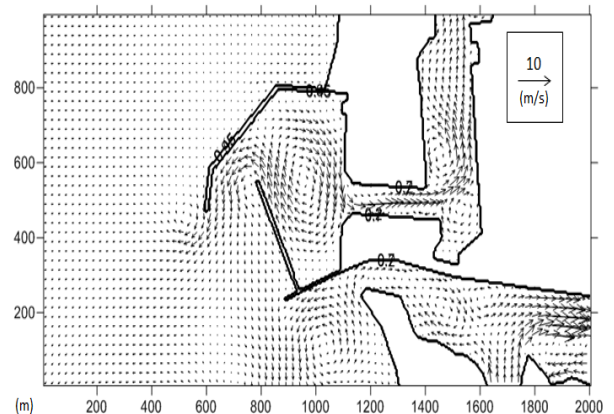


図-6(b) 650 秒後 新港：引波 旧港：入波

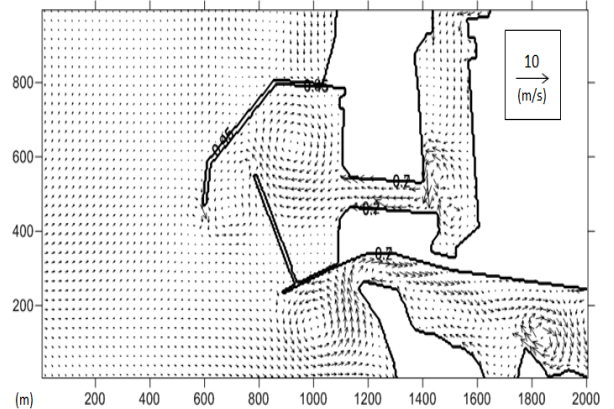


図-6(c) 2600 秒後 新港：引波 旧港：引波

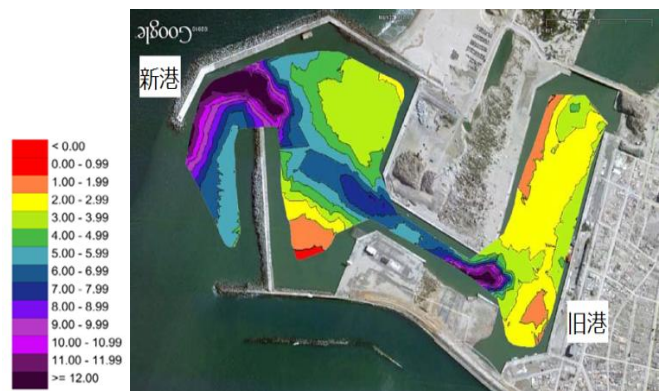


図-7 松原らによる浅深測量結果

図-8 は津波の流動計算を行った領域を示している。図中に記している A-A' 断面について水位を計算すると、図-9 が得られた。青線は 260 秒後、赤線は 650 秒後、緑線は 2600 秒後の水位を示している。260 秒後では入波により水位が高く新港港内において時計回りの循環流が見られる。650 秒後では旧港入口で強い流れが見られ、旧港内の水位が上昇し、港内においても循環流が見られ、これらの場所は土砂が堆積した領域である。2600 秒後においては引波であるため、新港旧港どちらにおいても水位は低い。

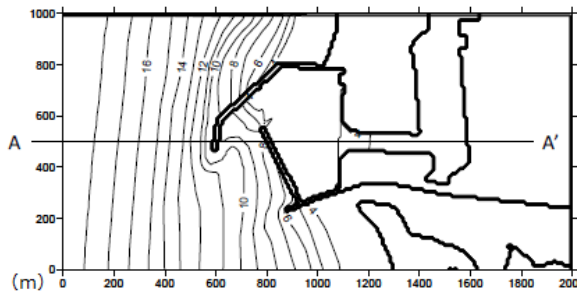


図-8 水位計算断面 A-A'

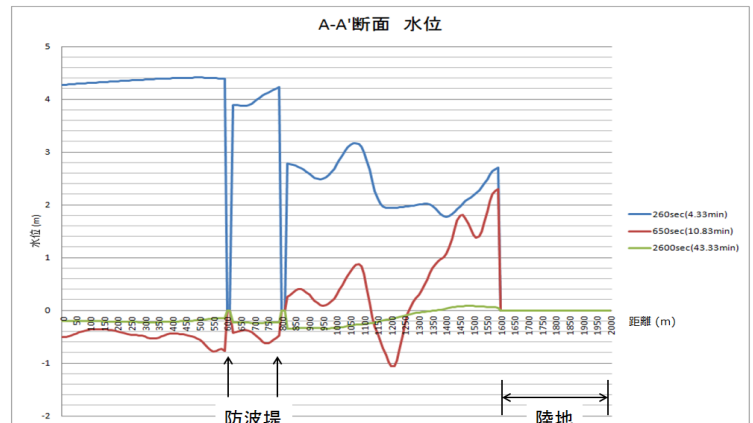


図-9 A-A' 断面における水位 (260, 650, 2600 秒後)

5. まとめ

本研究では、実際に東北地方太平洋沖地震によって発生した津波を再現し、得られた波形を入力波として与えることによって関上漁港港内における流動計算を行った。結果の検証は松原らによる深浅測量結果との比較であり、波の流れと土砂移動の法則性に基づいた予測であったため、正確な検証結果であるとは言えないが、結果はこの法則性を満足しており、定性的に時計回りの循環流も再現されていた。実際に土砂移動の計算を数値計算モデルに考慮することで、津波による地形変化を再現することができれば、松原らによる深浅測量結果と直接比較ができるため、より詳細な検証を行うことができる。

今後の課題として、流動計算のフローチャートに流砂の計算を考慮し、地形変化の様子を再現する。また、実際の津波は遡上するが本研究では津波の陸地への遡上は考慮していないので、実際の津波を再現するためにはこれも考慮して計算を行う必要がある。そのために、流動計算に用いた数値計算モデルを見直すと同時に改良する予定である。

参考文献：

- (1) Yasuhiro Yoshikawa , Takuya Inoue : iRIC Software CERI1D Solver Manual
- (2) iRIC Easy-performable Long-wave Inundation Model (ELIMO) Users Guide Ver.1.0
- (3) 後藤智明・小川由信：Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法 P1～13, 1982
- (4) 松原雄平・黒岩正光:小型サイドスキャンソナーを用いた宮城県名取市関上漁港の東北地方太平洋沖地震による津波被害調査
- (5) 土木学会 第 68 回年次学術講演会講演概要集, 第 II 部門, pp. 369-370, CD-ROM, 2013
松原雄平, 黒岩正光, 渋谷容子, 市村康, 米花正三