

短周期波成分を含む津波の伝播の非線形数値解析

鹿児島大学工学部	学生会員	岸良美香
鹿児島大学大学院理工学研究科	正会員	柿沼太郎
鹿児島大学大学院理工学研究科	学生会員	山下 啓

1. 研究の目的

2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波の水面変動が、水深約 204 m の岩手南部沖に設置されている GPS 波浪計により観測された (河合ら, 2011). この結果より 0.5 m 程度の水位低下の後, 10 分間で約 2.5 m 緩やかに水位が上昇し, そして, その後の 4 分間に 4.7 m もの急激な水位上昇が生じたことがわかった. このような 2 段階にわたる水位の上昇を示す津波波形が, 東北地方太平洋沖地震津波の特徴の一つである. そこで, 本研究では, 非線形波動方程式に基づく数値解析を実施し, 長周期波成分と短周期波成分から構成される津波がどのような伝播特性を示すかを調べる.

2. 基礎方程式と数値解析法

非粘性・非圧縮性流体の, 鉛直断面内の非回転運動を対象とした. 速度ポテンシャルを $\phi(\mathbf{x}, z, t) = \sum_{\alpha=0}^{N-1} \{f_{\alpha}(\mathbf{x}, t) \cdot z^{\alpha}\}$ のように N 個のべき関数の重み付き級数に展開する. そして, 変分法 (柿沼, 2001) に基づき得られた非線形波動方程式系を基礎方程式系とし, これを Nakayama・Kakinuma (2010) に類似した差分法を用いて解いた. なお, 本研究では, 速度ポテンシャルの展開項数 N は, 波の分散性が考慮される最低次数である 2 とした.

3. 数値解析条件

図-1 (a) 及び (b) に示す鉛直断面内の運動を対象とする. ここで, 図-1 (a) の領域では, 斜面より沖側の静水深及び岸側の静水深は, それぞれ, 207 m 及び 70 m である. この二つの領域の間の斜面は, 釜石湾口防波堤沖の実地形の平均斜面勾配 $s=0.01$ を有する斜面 (213.7 km ~ 227.3 km) とする. 他方, 図-1 (b) の領域では, 静水深が 207 m の一様静水深域である. 計算対象領域の両端を完全反射の鉛直壁とする. 計算格子間隔及び計算時間間隔は, それぞれ, $\Delta x = 100$ m 及び $\Delta t = 0.02$ s である.

まず, 岩手南部沖 GPS 波浪計が捉えた 2 段階に水位上昇する津波第 1 波の水面変動の時系列から, 沖側における津波初期波形を津波伝播の数値解析に基づく試行錯誤により推定し, 津波波形のモデル化を行なった. これを図-2 のモデル I に示す. ここで, 初期波長 50.0 km, 初期波高 14.0 m である. そして, このモデル I の初期波形に基づき峰の位置の差異 (モデル I ~ III) 及び, 短周期波成分の前面勾配の差異 (モデル III ~ V) を考慮し様々な津波波形モデルを作成した. これらのモデル波形 I ~ V を初期時刻 ($t=0$ s) における初期水面形とし, 初期流速を至る所で 0 として, 生成し, 伝播する津波の数値解析を行なった. なお, 全モデル津波波形の傾斜部分は, 正弦波形で表現されている.

4. 数値解析結果

図-3 に, モデル波形 I ~ V の初期条件より生成した津波が, 図-1 (a) に示した実地形の斜面を有する領域を伝播した場合の釜石湾口防波堤地点 (227.3 km 沖) における水面変動を示す. モデル I ~ III の峰の位置の差異は, 有意な差を示さなかった. 一方, モデル III ~ V では, モデル IV において津波高さが最大となった. これは, モデル IV の初期波形の前面勾配が急峻であるためと考えられる.

図-4 に, モデル波形 I ~ V の初期条件より生成した津波が, 一様水深 $h=207$ m を有する図-1 (b) の領域に伝播した場合の $t=5000$ s における水面形の数値解析結果を示す. モデル I ~ III の峰の位置の差異は, 有意な差を示さなかった. 一方, モデル III ~ IV では, モデル IV において, 津波高さが最大となり, また, モデル V において, 津波高さが最小であり, かつ, 峰の分裂が発生していない. このように, 前面勾配が急峻な波形では, 伝播に伴い, 前面勾配が緩やかな波形よりも津波高さが大きく発達する.

図-5 に, モデル波形 I ~ V の初期条件より生成した津波が, 図-1 (a) に示した実地形の斜面を有する領域に伝播したときの, $t=5000$ s における水面形の数値解析結果を示す. 峰の位置が異なるモデル I ~ III において, モデル I では, 第 1 波の津波高さが最大, モデル II では, 第 6 波の津波高さが最大, モデル III では, 第 2 波の津波高さが最大となり, モデル I のように峰が伝播方向に対して前方に位置する場合に, 津波高さがより大きくなる傾向がある. すなわち, 振幅が相対的に大きな短周期波成分が, 浅水変形によって波高が増加した長周期波成分に追い付き干渉する場合, 波高が大きく増加すると考えられる. 峰が後方に位置するモデル II の場合, 対象とした計算時間内では, 短周期波成分が長周期波成分に追い付いておらず, 津波高さの最大値がやや小さい. 他方, 前面勾配が異なるモデル III ~ V において, モデル IV は, 第 1 波の津波高さが最大, モデル V は, 第 2 波の津波高さが最大となり, 前面勾配が急峻なモデル IV が全モデル波形の中で, 津波高さが最も高い.

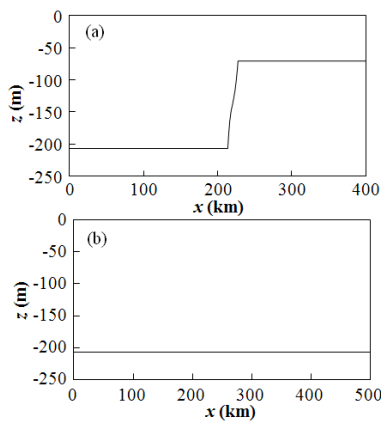


図-1 計算対象領域

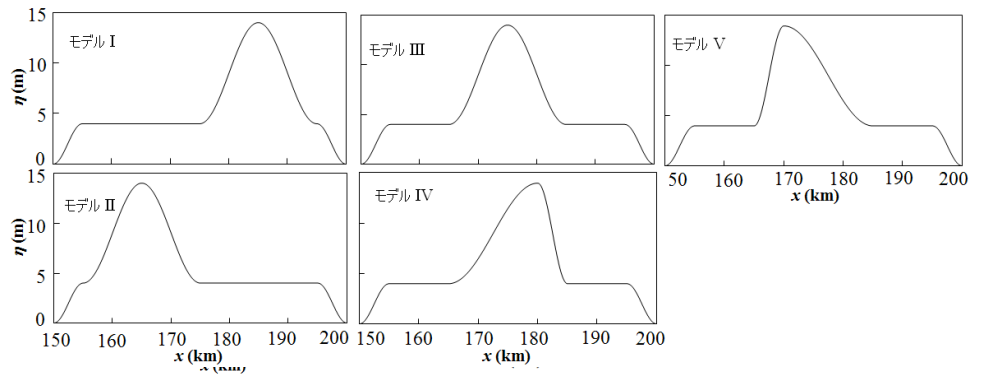


図-2 津波初期波形のモデル

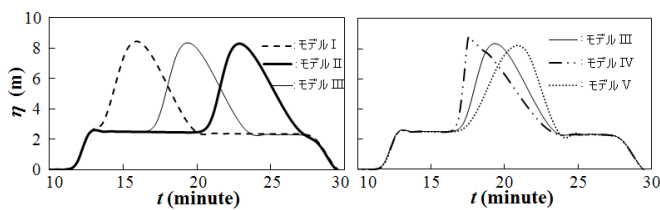


図-3 釜石湾口防波堤地点の水面変動

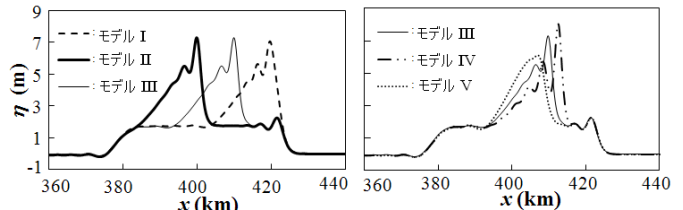


図-4 一様静水深水域の $t=5000$ s における水面形

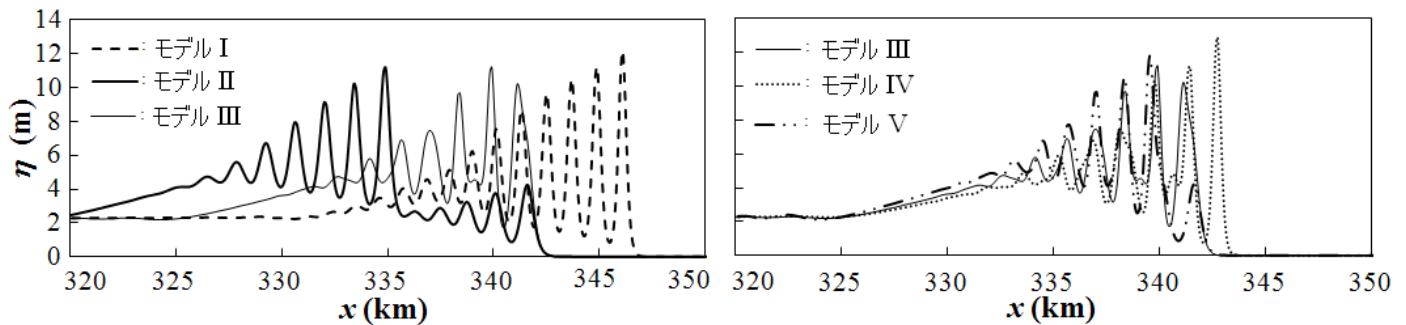


図-5 実地形の斜面を伝播した場合の $t=5000$ s における水面形

すなわち、初期波形の勾配が急な津波ほど、津波高さが大きくなる傾向があると言える。また、前面勾配が急峻な津波ほど、津波高さが最大である波のピークが到達する時刻が早くなっている。

5. 結 論

長周期波成分と短周期波成分から構成される津波の伝播を対象として、非線形波動方程式系に基づく数値解析を行なった。すなわち、岩手南部沖 GPS 波浪計が捉えた 2 段階に水位上昇する津波第 1 波の水面変動の時系列から、沖側における津波初期波形を推定し、この推定津波波形を峰の位置や短周期波成分の勾配の特徴に着目してモデル化し、これらが津波の伝播に対してどのような影響を及ぼすのかを調べた。津波初期波形の峰の位置に対しては、釜石湾口防波堤地点での水面変動に、有意な差が見られなかった。一方、短周期波成分の前面勾配は、それが急峻な津波ほど、津波高さがやや高くなり、津波高さが最大である波が到達する時刻が早くなった。また、浅い領域を津波が長距離伝播する場合、相対的に大きな短周期波成分が、浅水変形により波高が増加した長周期波に追い付くと、津波高さが大きく発達することがわかった。

今後、実地形の領域を拡張し、岩手県南部沖 GPS 波浪計が捉えた津波波形から、震源域における津波初期波形を推定して、水位が 2 段階で上昇するような津波の伝播特性に関して検討を進めたい。

参考文献

- 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二・関 克己: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震津波の特性, 港湾空港技術研究所報告, 第 50 巻, 第 4 号, pp. 3-63, 2011.
- 柿沼太郎: 透水性海浜における内部波の挙動の数値計算, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 146-150, 2001.
- Nakayama, K. and Kakinuma, T.: Internal waves in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 62, pp. 574-590, 2010.