

地変に伴う津波生成の数値計算 —3次元モデルと非線形長波モデルの比較—

港湾空港技術研究所 正会員 ○柿沼 太郎
みずほ情報総研株式会社 秋山 実

1. 序 論: 地変に伴う津波の発生過程を対象として、鉛直2次元の数値シミュレーションを行なった。二つの異なるモデルを用いた数値計算、すなわち、3次元モデルを用いた計算（これを3Dと呼ぶ。）と非線形長波モデルを用いた1次元計算（これをLWと呼ぶ。）とを実行し、時間とともに進行する海底の隆起や沈降によって生成される津波の水面形について、両者の結果を比較した。更に、隣接部が引き続き隆起する場合をLWにより解析した。

2. 数値解析モデル: 3Dでは、非圧縮性流体の運動を対象とした連続方程式及び Reynolds 平均された Navier-Stokes 方程式を基礎方程式とし、静水圧近似や長波近似を行なわない数値モデル¹⁾を適用する。このモデルは、海底地形の変化及び水面位置の変動をそれぞれ空隙率及び VOF 関数を用いて考慮することにより、全ての計算格子を固定したままで底面と水面の両者の変動を考慮できるという特徴を有する。他方、LWでは、非線形・非分散の長波理論を基礎方程式とする1次元モデル、すなわち、非圧縮性流体の非回転運動を対象とした多層流体モデル²⁾において層数を1としたモデルを適用する。後者のLWでは、前者の3Dと異なり、静水圧分布を仮定している。

計算対象領域を $0\text{ km} \leq x \leq 90\text{ km}$ とする。計算格子間隔は、3Dでは、 $\Delta x = \Delta y = 1\text{ km}$, $\Delta z = 50\text{ m}$ とし、 y 軸方向の格子数を1とする。他方、LWでは、 x 軸方向の計算格子間隔を同様に $\Delta x = 1\text{ km}$ とする。また、計算時間間隔は、両者の計算とも $\Delta t = 0.5\text{ s}$ とする。

3. 海底の隆起速度が一定である場合の津波発生過程の数値計算: 初期状態を一樣水深 h_0 の水域における静水状態とし、初期水位 ($z=0$) から鉛直上向きに正の向きとなるように z 軸をとる。地変として、海底の $30\text{ km} \leq x \leq 60\text{ km}$ の部分が、一定速度で均一に隆起する場合を考える。すなわち、この領域内の底面が、鉛直上向きに 0.15 m/s の速度で上昇し、 $t=0 \sim 20\text{ (s)}$ の 20 s 間変形した後、停止する。その結果、地盤の永久変位の大きさは、 3 m となる。ここで、変位は、ある時間後の鉛直方向の移動距離を表わし、鉛直上向きに正とする。3Dでは、この地変を数値計算で表現するために、その 20 s の間、 $30\text{ km} \leq x \leq 60\text{ km}$ を占める最下位の格子の空隙率を1から0.94に一定の割合で減少させる。他方、LWでは、 $30\text{ km} \leq x \leq 60\text{ km}$ における底面位置 $z=b$ の時間変化 $\partial b/\partial t$ を与える。

初期水深が $h_0 = 500, 1,000$ 及び $4,000\text{ m}$ の場合の、時刻 $t=20\text{ s}$ における水面形を図-1に示す。図-1より、水深が相対的に浅いと、時刻 $t=20\text{ s}$ における水面形、すなわち、津波のいわゆる初期波形は、3DとLWの結果に殆ど差がなく、両者とも地形の永久変位にほぼ一致している。しかし、水深が深い場合には、図-1(c)に見られるように、地変の端部上において津波初期波形の空間勾配がなだらかになり、この傾向は、3Dの方がLWよりも著しい。また、3Dの方がLWより波長が長くなる。従って、3DとLWにより算出された津波では、特に、次のような2点の違い、すなわち、1) 生成された津波の位置エネルギーの相違及び 2) 伝播する津波の波形勾配の相違が現れる。このうち、生成された津波の位置エネルギーは、初期津波波形を $z = \eta_0$ とし、次式で表わされる。

$$PE = \int \int_{z=0}^{\eta_0} \rho g z \, dz \, dx = \frac{\rho g}{2} \int \eta_0^2 \, dx$$

ここで、海水の密度 ρ が一様かつ一定であると仮定している。また、 g は、重力加速度である。海底の隆起によって非圧縮性の水の一部が静水面より上に押し出され、その体積は、この場合、津波生成時に水面振動が発生していないから、地盤の隆起した体積に匹敵し、3DとLWで等しい。ところが、図-1(c)の場合、持ち上げられた水塊の位置エネルギーは、LWの方が3Dよりも大きい。すなわち、図-1(c)に示した領域Aの面積の水が、LWでは、高位の領域Bに持ち上げられている。この高みに上がった水は、水塊を崩す等して過剰なエネルギー減衰を引き起こさない限り、伝播波のポテンシャルを高める。伝播する津波の波形勾配の相違については、5.で述べる。

4. 海底の隆起部と沈降部が隣り合う場合の津波発生過程の数値計算: 海底の隣り合う $30\text{ km} \leq x < 45\text{ km}$ 及び $45\text{ km} \leq x \leq 60\text{ km}$ の部分が、それぞれ、一定速度で均一に隆起及び沈降する場合を考える。変形速度は、それぞれ、

キーワード → 津波, 海底変動, 3次元数値計算, 空隙率

連絡先 → 〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 港湾空港技術研究所, Phone: 046(844)5052, E-mail: kakinuma@pari.go.jp

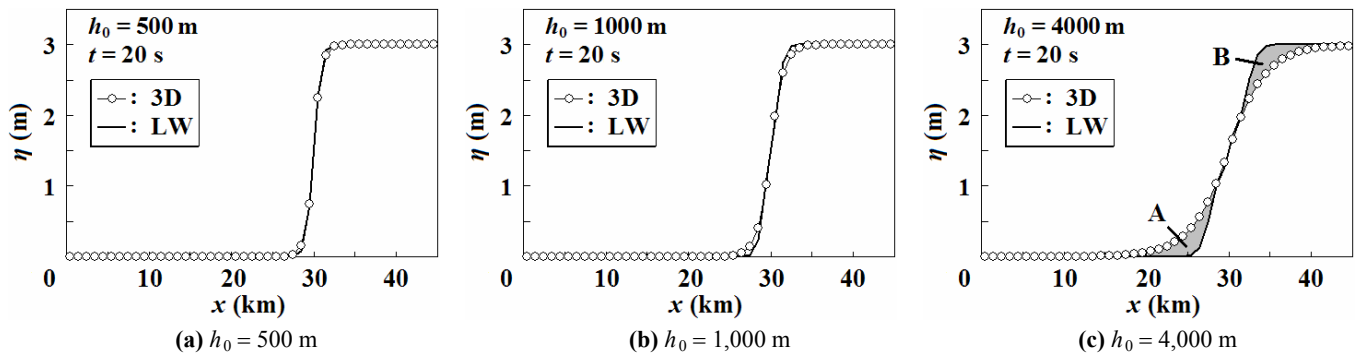


図-1 海底の一部の領域が隆起する場合に生成する水面形 ($t = 20$ s)

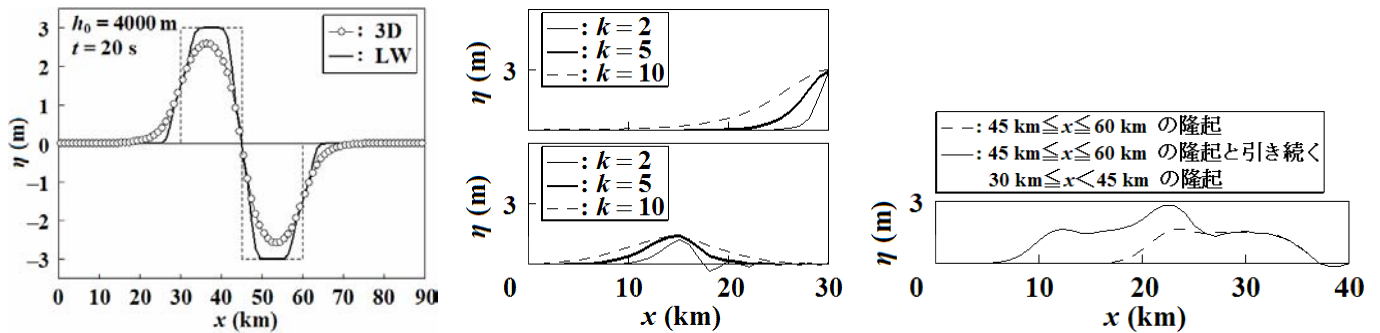


図-2 海底の隆起部と沈降部が隣り合う場合の津波の水面形 ($t = 20$ s)

図-3 伝播波形の初期波形による違い (上図: $t = 0$ s, 下図: $t = 90$ s)

図-4 引き続き隣接部が隆起する場合に生成する津波の水面形 ($t = 140$ s)

0.15 m/s 及び -0.15 m/s であって、両部分とも、 $t = 0 \sim 20$ s の 20 s 間変形した後、停止する。図-2 に、初期水深が $h_0 = 4,000$ m の場合の $t = 20$ s における水面形を示す。3D の水面変動の極値は、図中に破線で示した地盤の永久変位に達しない。また、3D 及び LW とも、水面形の空間勾配の絶対値は、地形の変化領域の端部 ($x = 30$ 及び 60 km) 付近と、隆起部と沈降部の境界 ($x = 45$ km) 付近とで異なり、前者の方が緩やかである。

5. 津波の初期波形の伝播津波への影響: 津波の初期波形は、分離して、津波として伝播する。この伝播する津波の波形は、初期波形に依存するであろう。そこで、初期水深が $h_0 = 4,000$ m である水域に、 $\eta_0 = 6/(10^5 + 10^{-5})$, $s = (x/1000 - 30)/k$ なる初期波形が生じたと想定し、 $k = 2, 5$ 及び 10 としたときのそれぞれの状態を初期波形として伝播し始める津波の水面形の LW による計算結果を図-3 に示す。数値計算では、初期波形の半分を描いた図-3 の初期状態において、速度ポテンシャルを至る所で 0 としている。これより、異なる初期波形から伝播した津波の波形勾配に差異が見られる。また、 $k = 2$ の場合には、津波の tail に振動が見られる。こうした波形勾配の異なる津波は、沿岸域に伝播すると異なった浅水変形を見せ、それらの砕波点位置も一致しないであろう。従って、同一の地変を対象として得られる津波の初期波形が 3D と LW で異なれば、それらに基づいて算出される様々な値、例えば、津波が構造物や海浜にもたらす流体力やその継続時間といった値が、異なる値として評価されることになる。

6. 引き続き隣接部が隆起する場合の津波の生成: 海底の一部が隆起した後、その隣接部が引き続き隆起する場合を考える。海底の $45 \text{ km} \leq x \leq 60 \text{ km}$ の部分が $t = 0 \sim 20$ s の間変形してから停止した場合と、この隆起に引き続いて $30 \text{ km} \leq x < 45 \text{ km}$ の部分が $t = 20 \sim 40$ s の間変形してから停止した場合の、 $t = 140$ s における津波波形の LW による計算結果を図-4 に示す。ここで、隆起速度は、いずれの地変も 0.15 m/s であり、地盤の永久変位は、 3 m である。後者では、第 1 の隆起で生成して伝播する津波が海底の第 2 の隆起によって更に押し上げられ、これらの波源域の外に伝播する津波の水面変動の最大値が、前者の場合の約 1.7 倍になっている。

7. 結 論: 同一の地変を対象としても、条件によって、得られる津波の初期波形が 3D と LW で一致せず、それぞれに基づく津波の伝播計算の結果も異なる。その場合、津波の波形勾配、砕波点位置や、流体力及びその継続時間といった評価値も違ってくるであろう。また、伝播中の津波は、その下方の海底隆起によって成長すると、地盤の永久変位よりも大きな水面変動を持つようになる。このような地変は、津波地震の一形態であるかも知れない。

参考文献

- 1) 柿沼太郎・秋山 実: 海底地形の変動に伴う津波発生過程の数値計算, 海岸工学論文集, 第 52 巻, 2005.
- 2) 柿沼太郎: 海底の変動によって発生し伝播する表面波及び内部波の数値計算, 土木学会第 56 回年講概要集, II, pp. 4-5, 2001.