

海底地形の変動に伴う津波発生過程の数値計算

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: 海底地震に伴う津波の数値シミュレーションでは、asperity や走向の分布を考慮して幾つかの segment に分割した断層形状を推定し、これによって生じる海底地震後の地盤の永久変位を算出して、この変位を初期海面変位と仮定し、これを初期条件として津波の伝播計算を開始する。また、断層の破壊位置が時間とともに移動する場合には、各 segment の破壊時刻をずらして、同様の計算を行なう。ところが、これらのうちの一つの segment の破壊に対しても、津波は、時間に依存する過程を経て生成する。例えば、海底変形が比較的緩慢に進行する (creeping) 場合、津波が生成すると同時に伝播するため、永久変位後の海底地形と異なる海面形が生成することは、想像に難くない。海底地震に伴い発生する津波の解析解として、高橋 (1942)、Momoi (1962) 及び Kajiura (1963) らが線形の、そして、Hammack (1973) が弱非線形の解を示した。津波発生の水理実験は、例えば、Hammack (1973) 及び松山ら (1995) により行なわれ、実験結果が、それぞれ、Nakayama (1983) 及び松山ら (1995) によって、速度ポテンシャルを仮定した境界要素法を用いた数値計算の結果と比較された。大町・仲摩 (1997) は、3次元数値計算手法を適用し、海底面の Rayleigh 波がもたらす水面変動を再現した。これらは、主として、生成される水面形に着目した研究であるが、特に、海底が複雑な形状を有し、その隆起・沈降速度が時間とともに任意に変化する場合には、発生する流速場及び圧力場の時間変化を詳細に考慮することによってこそ、正確な水面形を求めることが可能となるであろう。そこで、本研究では、静水圧近似を行なわない数値計算手法を適用し、海底地形の変化によって津波が発生する過程における流体運動を対象とする数値計算を行ない、時間とともに進行する海底の隆起や沈降に伴って、水面形や、流体内の速度、加速度及び圧力の分布がどのように変化するか調べる。

2. 数値計算法: 数値計算には、STOC (富田ら, 2004) に組み込まれた 3次元解析部を適用する。すなわち、基礎方程式系は、空隙率を考慮した連続方程式及び Navier-Stokes の運動方程式であり、直交格子を用いた差分法によってこれらを解く。その際に、圧力に関する Poisson 方程式を解き、静水圧のみならず動圧の効果も考慮する。長波近似や非回転運動の仮定を用いないため、流速及び加速度の鉛直方向成分についても渦度を含めて検討できる。

海洋における海底地震津波の発生過程を計算対象とする場合、対象領域の水深が水面変動の $10^2 \sim 10^3$ 倍のオーダーとなるため、鉛直方向の格子間隔を水面変動並びに底面変動よりも大きく設定することが効率的である。そこで、自由水面近傍に 3次元 VOF 法を適用し、VOF 関数 F に関する移流方程式から求まる F 値によって、格子内部の水面変動をとらえる。他方、海底の地形変動を表現するために、海底付近に存在する各格子の空隙率を時間とともに変化させ、格子内部の海底の隆起や沈降を与える。こうすることによって、すべての計算格子を固定したままで、1格子内においても変動する水面及び地形の時間変化を考慮することができる。

3. 隆起や沈降の速度が一定である場合の数値計算: 非圧縮性流体を対象とし、流体の密度が $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ で一定であるとする。本論文における計算では、鉛直断面 2次元の運動を対象とし、また、動粘性係数を $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ として、格子サイズ以下の乱れの影響を考慮しない。初期状態を一様水深 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。格子間隔は、 $\Delta x = \Delta y = 1,000 \text{ m}$, $\Delta z = 50 \text{ m}$ とし、 x , y 及び z の各軸方向の格子数をそれぞれ 90, 1 及び 82 とし、初期水面上に空気セルを 2格子設ける。すべての固定境界上で slip 条件を仮定する。計算時間間隔は、 $\Delta t = 0.5 \text{ s}$ とする。まず、海底の $30 \text{ km} \leq x \leq 60 \text{ km}$ の部分を一定速度で一様に隆起させる。すなわち、その部分が、鉛直上向きに 0.15 m/s の速度で変形し、 $t = 0 \sim 20 \text{ s}$ の 20秒間変形した後、停止する。永久変位の大きさは、 3 m となる。この間、 $30 \text{ km} \leq x \leq 60 \text{ km}$ を占める最下位の格子の空隙率を 1 から 0.94 に減少させる。初期水深が $h_0 = 4,000 \text{ m}$ である場合の時刻 $t = 20 \text{ s}$ における隆起部先端付近の流速分布を図 1 に示す。このうち、図 1(b) の計算では、隆起部に隣接する最下位の格子 (隆起部全体の左隣及び右隣の合計 2 個の格子) の空隙率を常に 0 と設定し、隆起部が高さ Δz の壁に挟まれていると仮定している。図 1(a) と (b) のそれぞれに対応する $x = 29.5 \text{ km}$ 及び 45 km における水面変動 η と $(x, z) = (26.5 \text{ km}, 75 \text{ m} - h_0)$,

キーワード → 津波, 海底地震, 数値計算, 動圧

連絡先 → 〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所, Phone: 046(844)5052

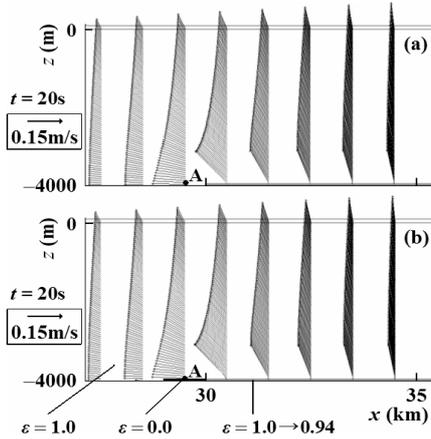


図1: 隆起部先端付近の流速分布

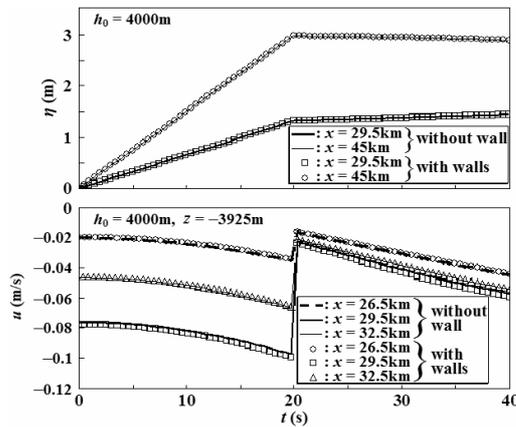


図2: 水面変動及び流速の水平方向成分

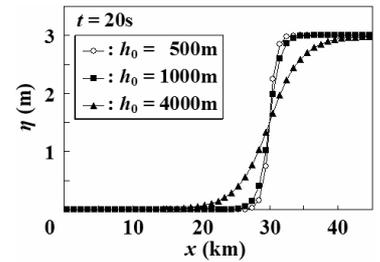


図3: 水面形の初期水深による違い

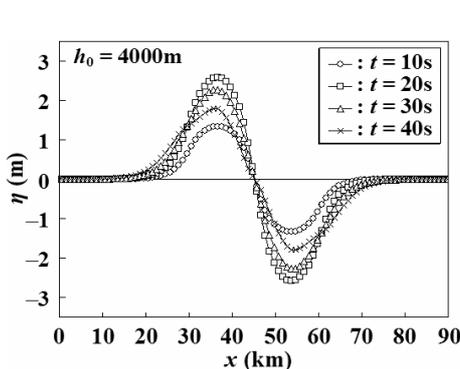


図4: 隆起域と沈降域が隣り合う場合の水面形の時間変化

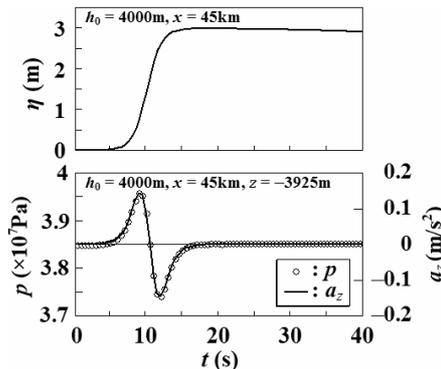


図5: 水面変動及び総圧と加速度の鉛直方向成分の時間変化

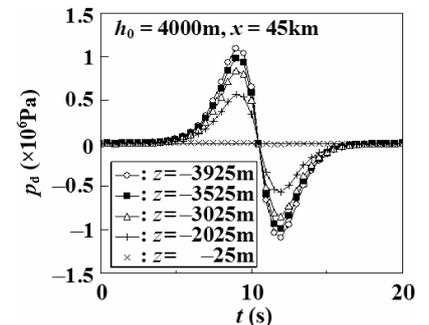


図6: 各深さにおける動圧の時間変化

(29.5km, 75m- h_0) (点 A) 及び (32.5km, 75m- h_0) における流速の水平方向成分 u の時間変化とを図2に示す。両者には、隆起部先端の底面付近における流速を除いて有意な差異がなく、空隙率の変化によって海底隆起が再現されていることが確認できる。以降の計算では、こうした壁を設けない。初期水深が $h_0 = 500\text{m}$, $1,000\text{m}$ 及び $4,000\text{m}$ である場合の $t = 20\text{s}$ における水面形を図3に示す。このように、津波初期波形は、水深に依存し、地形の変位と必ずしも一致しない。次に、海底の隣り合う $30\text{km} \leq x < 45\text{km}$ 及び $45\text{km} \leq x \leq 60\text{km}$ の部分をそれぞれ一定速度で一樣に隆起及び沈降させる。変形速度は、それぞれ、 0.15m/s 及び -0.15m/s であって、两部分とも、 $t = 0 \sim 20\text{s}$ の20s間変形した後、停止する。図4に、初期水深が $h_0 = 4,000\text{m}$ である場合の水面形の時間変化を示す。

4. 隆起速度が変化する場合の数値計算: 隆起速度が変化する場合を対象とする。すなわち、海底の $30\text{km} \leq x \leq 60\text{km}$ の部分を空間的に一樣に隆起させるが、隆起速度を時間とともに変化させる。そのために、所定の位置の格子の空隙率 ε を1から0.94まで、 $\varepsilon = (1+0.94)/2 - (1-0.94)/2 \times \tanh\{0.5(t-10)\}$ に従って20s間変化させ、その後、0.94に保つ。永久変位は、3mに相当し、初期水深が $h_0 = 4,000\text{m}$ である場合、 $x = 45\text{km}$ における水面変動が図5に示すようになる。また、図5に、このときの $x = 45\text{km}$, $z = 75\text{m} - h_0$ における総圧 p と加速度の鉛直方向成分 a_z の時間変化を示す。大町ら (2000) は、流体の圧縮性に起因する海底水圧変動について、疎密波を考慮した数値計算により言及したが、図5より、海底の隆起速度が変化する場合、非圧縮性流体の運動においても、圧力の静水圧からのずれ、すなわち、動圧が発生することがわかる。図6に、各深さにおける動圧 p_d を示す。水平方向に対称である隆起部中央付近では、 p_d の鉛直方向の勾配と a_z とが釣り合うため、動圧 p_d は、ほぼ線形の鉛直分布を有する。

5. 結論: 圧力の Poisson 方程式を解く、非圧縮性流体を対象とする数値計算手法を適用して、海底地形の変動に伴う津波の発生過程の数値シミュレーションを行なった。VOF 関数と空隙率を用いることによって、すべての計算格子を固定したままで、1格子内でも変動する水面及び地形の変化を考慮することが可能である。なお、加速度の鉛直方向成分の検討では、津波数値計算シンポジウム (東北大学, 2005年2月) における議論が参考になった。

参考文献: 大町・仲摩 (1997), 海岸工学論文集, **44**, 311-314.; 大町・築山・松本・細川 (2000), 海岸工学論文集, **47**, 361-365.; 高橋 (1942), 地震研究所彙報, **20**, 375-400.; 富田・柿沼・島田 (2004), 海岸工学論文集, **51**, 296-300.; 松山・池野・田中 (1995), 海岸工学論文集, **42**, 226-230.; Hammack (1973), J. Fluid Mech., **60**, 769-799.; Kajiwara (1963), Bull. Earthq. Res. Inst., **41**, 535-571.; Momoi (1962), Bull. Earthq. Res. Inst., **40**, 759-765.; Nakayama (1983), Int. J. num. Meth. Engng., **19**, 953-970.