

# 種々の海底地形における津波の伝播

合田智美 (指導教員：河村哲也)

## 1 はじめに

津波は地震・火山による災害と並び、規模や被害が大きな自然災害である。近年では、2004年のインドネシアのスマトラ島沖地震とそれに伴う大津波などが挙げられる。そこで本研究では、海底地形の差による津波の伝播に着目し、その違いを3次元計算で解析する。

## 2 モデル化・格子生成

図1に計算空間を示す。x方向を沿岸に向う方向、y方向を鉛直方向とした三次元空間において境界に沿った不等間格子を用いる。各方向の比率は  $x : y : z = 10\pi : 3.8 : 15\pi$ 、格子数は  $101 \times 20 \times 121$  とする。本研究では、遠浅の地形 (Type1) と起伏のある地形 (Type2) の2種類の地形を比較の対象とした。

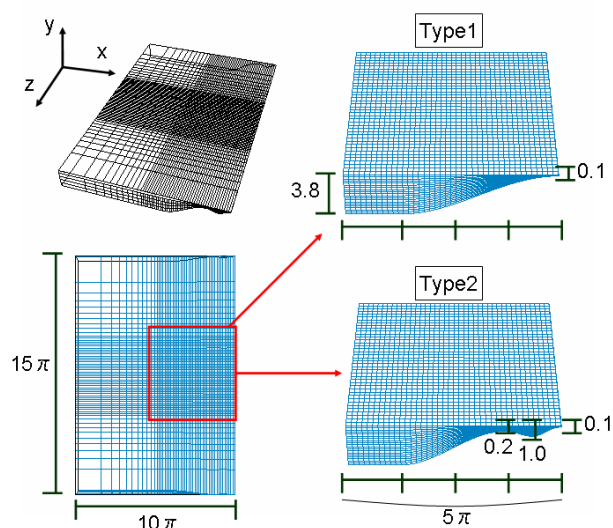


図1: 計算領域

## 3 計算方法

基礎方程式は連続の式 (1) と非圧縮性 Navier-Stokes 方程式 (2) で、フラクショナル・ステップ法を用いて計算する。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{u} + g \mathbf{j} \quad (2)$$

$\mathbf{u}$ : 速度ベクトル  $p$ : 圧力  $t$ : 時間  
 $Re$ : レイノルズ数  $g$ : 無次元重力加速度  
 $\mathbf{j}$ : y 方向の単位ベクトル

時間間隔は  $\Delta t = 0.00002$ 、レイノルズ数は  $Re = 380000$ 、重力加速度  $g$  は、流体の慣性力と重力の比を表すフルード数  $F_r^2 = u^2 / (gH)$  ( $H = 3.8$ : 代表長さ [水深]) を考慮して、 $g = 9800$  とした。計算ステップ数は 15000 である。

## 4 境界条件

表面は自由表面、底面は固定、側面は滑り壁条件 (Free Slip Boundary Condition: FSBC) とする。しかし、滑り壁条件は反射波が生じる可能性があるため、遠洋側の  $y-z$  面の境界条件としてはあまり適切でない。そこで、有限差分法に対する流出境界条件の1つである Sommerfeld 放射条件 (Sommerfeld Radiation Condition: SRC) を用いた解析も行う。具体的な境界条件を以下に示す。

[自由表面]

$$\frac{\partial y_{i,JM,k}}{\partial t} = v_{i,JM,k} \quad (3)$$

[FSBC: x-y 面]

$$w = 0, \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

[SRC: y-z 面]

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + U_c \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} = 0$$

$$u = 0 \text{ (if } u \leq 0 \text{)}$$

(3),(7) の IN, JM は境界上の格子点を表す添え字である。  $U_c$  は流出境界における法線方向の零でない "適当な" 対流速度である。  $U_c$  の決定法は、以下の一様流速度 (6) と流出境界における法線方向速度の最大値・最小値の算術平均値 (7) を用いた場合を比較する。

$$U_c = U \quad (6)$$

$$U_c(t) = \frac{\max(u_{IN,j,k}^n) + \min(u_{IN,j,k}^n)}{2} \quad (7)$$

その他、圧力は自由表面上で  $p = 0$ 、底面では  $p = gH$  とした。

## 5 計算結果と考察

### 5.1 流出境界条件の決定

詳細は省略するが、対象地形 Type1 において様々な条件で SRC と FSBC を比較した。そこで得られた結果より、本研究では遠洋側の  $y-z$  面の境界条件として以下を用いる。

<初期条件:波源>  
 波高=0.003 (3m),  $2.5\pi \times 10\pi$  (図2)  
 <境界上の自由表面の導出法>  
 $\frac{\partial y_{i,JM,k}}{\partial t} + U_c \frac{\partial y_{i,JM,k}}{\partial x} = 0$   
 <  $U_c$  の決定法 >  
 式 (7)

また、地震により海底が隆起して波が発生した状況を想定しているため、波源は振動させない。

## 5.2 計算結果

対象地形 Type1, Type2, そして傾斜のない平面地形 Type0 に対して, 次の 3 状況における計算を行った.

- case1 波源の波が岸に対して平行に生じた (図 2)
- case2 波源の波が岸に対し斜めに生じた (図 3)
- case3 海岸線に変化がある (岬や湾を想定) (図 4)

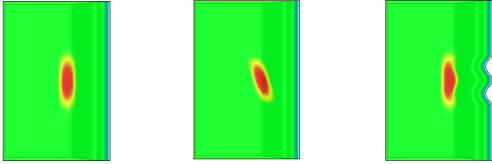


図 2: 平行 図 3: 斜め 図 4: 岸変形

津波のエネルギーは振幅により決定されるので波高に注目し, 等高線を図で, いくつかの代表点 (図 14) での時間における振幅の様子をグラフで比較した.

### 5.2.1 case1 における 3 種類の地形の比較

図 5,6,7 より波の伝播の様子と波高の大きさの違いが見て取れる. 特徴としては, 水深が浅くなると波の到達する速度が遅くなること (図 11), 地形の影響で Type2 の振幅が大きくなっていること (図 12), そして波源付近では波の振る舞いが同等であること (図 13) を確認できた. また, 図 8 より減衰する波の振幅が途中から増加している為 FSBC 境界条件では反射波が生じていると言える.

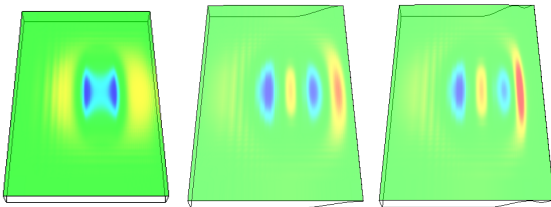


図 5: Type0 図 6: Type1 図 7: Type2

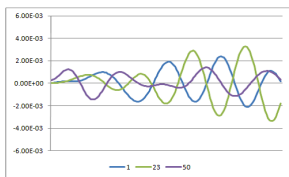


図 8: Type0(A,B,C)

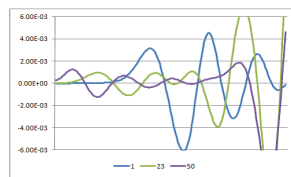


図 9: Type1(A,B,C)

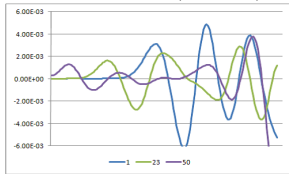


図 10: Type2(A,B,C)

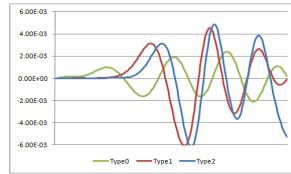


図 11: A(Type0,1,2)

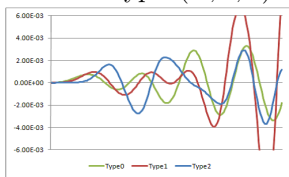


図 12: B(Type0,1,2)

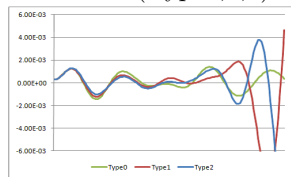


図 13: C(Type0,1,2)

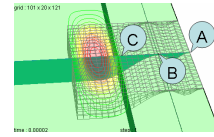


図 14: 代表点

### 5.2.2 case2 における 3 種類の地形の比較

図 16, 図 17 において斜めの波は徐々に海岸と平行になった. 図 15 では波源の形のまま同心円状に伝播していったことから地形 (水深) の変化が波に影響を与えていることが分かる. このことから, 水深が浅くなるにつれて波が海岸線 (地形) の形に変化していくという波の性質を確認できた.

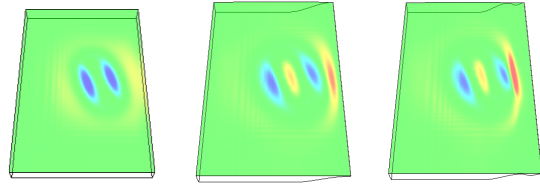


図 15: Type0 図 16: Type1 図 17: Type2

### 5.2.3 case3 における 3 種類の地形の比較

Type1, Type2 の地形に対しては, 図 19, 図 20 のような岬の先端を巻き込むような波の屈折効果や湾に流れ込む波の様子が確認できた. Type0 の地形に関しては, 図 18, 図 21 より岬の形状の部分での屈折による波の増幅がないこと (グラフ:水色) が視認できた. このことよりまた地形の変化が波に影響を与えていることが分かる.

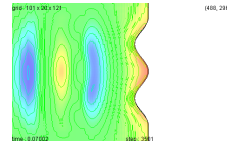


図 18: Type0

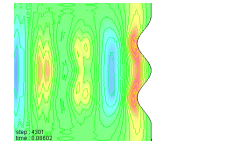


図 19: Type1

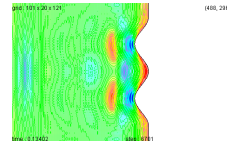


図 20: Type2

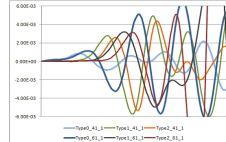


図 21: 岬と湾の比較

## 6 まとめと今後の課題

本研究では, 種々の海底地形における津波の伝播のシミュレーションを行った. 水深が浅くなるにつれて波の速度が遅くなり, 振幅が増幅されていく様子を確認することが出来た. また 3 次元計算を行うことにより, 波の 3 次元的な伝播の様子や反射波の影響, 陸地に迫る波の性質を視認することが出来た.

今後は, 実際の地形を用いることや海岸部での反射波の扱い方, 陸地に這い上がる波の表現方法等を考慮していきたい.

### 参考文献

- [1] 吉田尚史, 渡辺崇, 中村育雄: “非定常非圧縮流れの流出境界条件に関する数値的研究,” 日本機械学会論文集, 61-588, B(1995)
- [2] 信田創, 吉田尚史, 井上批路騎: “二次元噴流の DNS における境界条件の研究 (可視化による検討),” 第 21 回数値流体力学シンポジウム, D4-3 (2007)