

自由液面解析コード (FRESH-FV) を用いた津波遡上解析

米 山 望*・松 山 昌 史*

1. はじめに

わが国では、原子力や火力発電所のほとんどが、冷却水の取放水や燃料の輸送搬入の観点から海岸線に建設される。そのため、発電所の設計にあたっては、海岸水理的影響を十分な精度で予測しておく必要がある。その中でも、安全評価上から地震津波に関しては、津波の遡上と引きそれぞれが発電所の運転・制御に及ぼす影響を慎重に検討しなくてはならない。

津波の遡上・引きの予測は、現状では海岸工学の分野で用いられる非線形長波理論に基づいた計算法を陸上部にも適用できるように修正したものが用いられている。しかし、近年この計算法では現象に即した津波挙動の予測が難しいことが分かってきている。

一方、当所では自由液面の挙動を精度よく再現するために三次元自由液面解析コード (FRESH) を開発している (米山ら, 1995, 1996)。これは、流体の一般的な基礎方程式である Navier-Stokes 式を基礎式とし、液面の表現法に VOF 法 (Hirt ら, 1981) を用いた差分コードである。このコードを用いることにより、液面の複雑な変形や水際線 (水深が 0 になる線) を有する流れを再現できることを明らかにしている。そこで、本研究では本コードを改良し、津波遡上計算への適用を試みるとともに、従来の数値解析法や実験との比較を行いコードの妥当性を検証した。

2. 基礎式

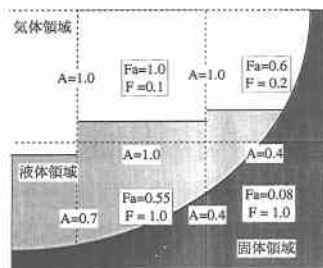
自由液面解析コード (FRESH) では以下に示す非圧縮流体の連続式および Navier-Stokes 式を基礎式としている。

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 U_i ；流速ベクトルの各方向成分、 G_i ；単位重量あたりの外力の各方向成分、 p ；圧力、 ν ；動粘性係数、 ρ ；水の密度である。

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 水理部



図一 計算セル内の固体、液体、気体の表現

しかし、FRESH はこの式を直交座標系上で離散化して数値解析を行っているため、海底勾配を正確に表現できない。そこで本研究では、基礎式を海底地形等の固体部分の存在を考慮して積分した式に変更して計算を行った。

計算領域中の固体形状は、榊山ら (1991) が行っているように各計算セルごとに定義した空隙率 Fa およびセル表面 (境界) の開口率 A を用いて表した (図一参照)。

空隙率 Fa は、計算セルの占める領域を V として、

$$Fa = \frac{\text{計算セル中の流体領域 } (V \cap \Omega) \text{ の体積}}{\text{計算セル } V \text{ の体積}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

と定義される。ここで、 Ω は全計算領域中の気体領域と液体領域を合わせた領域を表す。

また、開口率 A は、セル境界面の占める領域を a として、

$$A = \frac{\text{セル境界面中の流体領域 } (a \cap \Omega) \text{ の面積}}{\text{セル境界面 } a \text{ の面積}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

と定義される。図一中の F は各計算セルの液体存在率であり、以下のように定義される。

$$F = \frac{\text{計算セル中の液体領域の体積}}{\text{計算セル中の流体領域 } (V \cap \Omega) \text{ の体積}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

連続式 (1) を各計算セル (その領域および体積を V とする) で積分し、ガウスの発散定理を用いて簡略化すると、

$$\frac{1}{V} \iint_{\partial V \cap \Omega} U_j n_j dS = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表される。ここで ∂ は領域の表面を表す演算子であり、 $\{n_j\}$ は dS の法線ベクトルの要素である。

また、運動方程式 (2) を各流速定義点を含む領域 V_i (体積も V_i とする) で積分すると以下のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{1}{Fa V_i} \iint_{\partial V_i \cap \Omega} U_i U_j n_j dS = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \\ + \frac{\nu}{Fa V_i} \iint_{\partial V_i \cap \Omega} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} n_j dS + \frac{\nu}{Fa V_i} \iint_{V_i \cap \partial \Omega} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} n_j dS \\ \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

式 (6), (7) が, FRESH-FV の基礎式である。

3. 自由液面の移動法

FRESH および FRESH-FV では, 計算領域内の液体の分布を VOF 法に基づいて式 (5) で定義される液体存在率 F で表現する。液面の移動は以下に示す液面移動アルゴリズムに従って F 値を用いて計算される。

3.1 計算セルの分類

まず, 各計算セルをその F 値, 周囲のセルの状況および今回新たに加わった Fa 値を考慮してフラグ NF およびサブフラグ NFS を用いて分類する。

1. 気体セル ($NF=0$) セル中の流体領域が気体で満たされているセル ($F=0, Fa>0$)
2. 液体セル ($NF=1$) セル中の流体領域が液体で満たされているセル ($F=1, Fa>0$)
3. 共存セル ($NF=2$) セル中の流体領域に液体と気体が共存するセル ($0<F<1, Fa>0$)
 - a) $NFS=\pm 1$ セル内の気液境界面が x 軸に垂直
 - b) $NFS=\pm 2$ セル内の気液境界面が y 軸に垂直
 - c) $NFS=\pm 3$ セル内の気液境界面が z 軸に垂直 (符号は液体が共存セル内の気液境界面より, 各座標軸方向の正側にあるときが正となる。)
4. 境界セル ($NF=-1$) 計算上の境界となるセル
 - a) $NFS=0$ セル中に流体領域がない。 ($Fa=0$)
 - b) $NFS=1$ セル中の流体領域が液体および気体で満たされている。隣接する $NF \geq 1$ のセルとの境界面上の流速は勾配が 0 とする。 ($Fa>0, F>0$)
 - c) $NFS=2$ セル中の流体領域が液体および気体で満たされている。隣接する $NF \geq 1$ のセルとの境界面上の流速は境界条件として与える。 ($Fa>0, F>0$)

3.2 各セルへのフラグ割り当て

各セルのフラグは F 値が誤差を含むことを考慮した以下の手順により決定される。

1. $F>0$ であるセルを液体セル ($NF=1$), $F=0$ であるセルを気体セル ($NF=0$) とする。(境界セルはあらかじめ区別されているとする。)
2. 液体セルのうち気体セルに接しているものを共存セル ($NF=2$) にする。
3. 共存セルのうち, 液体セルまたは境界セルに接して

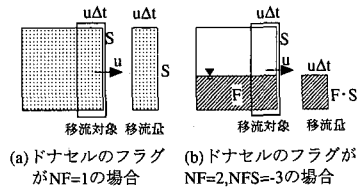


図-2 物体がない場合の体積の移動

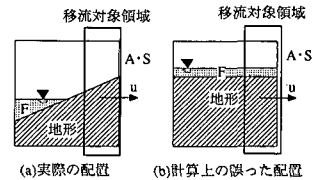


図-3 遡上計算での体積の移動

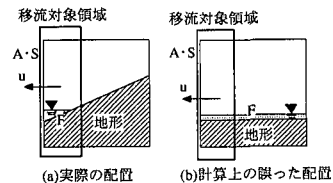


図-4 引き計算での体積の移動

いないものがあれば, それを気体セルとして 2. に戻す。なければ次に進む。

4. 共存セルの周囲の F 値分布に従ってセル中の境界面の向きを決定して NFS を定める。

3.3 液体の移動法

次にこのようにして求めたセルフラグを用いて, 液体を移流させる。その計算法には, ドナー-アクセプター法を用いる。この方法は, 隣り合うセルをその境界面上で定義される流速値 u の正負で流体を送り出すセル (ドナセル) と流体を受け取るセル (アクセプターセル) に分け, それらのセルフラグの組み合わせにより境界面を Δt の間に通過する量 (移流量) を決めていく計算法である。

固体部分が計算領域内に存在しない場合, 境界面の面積 S , 境界面上の流速 u およびドナセルの液体存在率 F を用いることで移動量 q を計算することが可能である。例えば, 図-2(a) では, $q=u\Delta t \cdot S$ また, 図-2(b) では, $q=F \cdot u\Delta t \cdot S$ などである。

しかし, 計算セル内に固体部分がある場合, 遡上の際には図-3(a), 引きの際には図-4(a) のような液体の配置になることがある。FRESH では計算セル内の液体配置を考慮せずに移流量を決めるため, それぞれ, 図-3(b), 図-4(b) のように解釈され, 移流量を正確に評価できない。特に, 引きに関しては図-4(b) で分かるよう

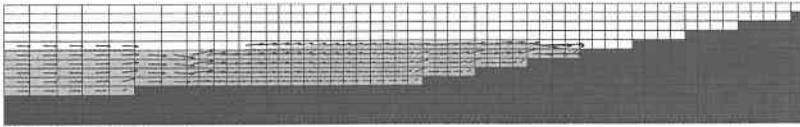


図-5 FRESHでの遡上の様子

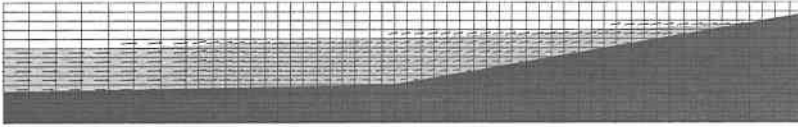


図-6 FRESH-FVでの遡上での様子

に、計算セル内に液体が長時間残留することが予想される。FRESH-FVではこの点のアルゴリズムを改良し、各境界面毎に液体の配置を考慮して移流量を算定するようにした。

以上のように、正確に求めた各セル境界の移流量を集計して Δt 後の F を求め、再びセルフラグを設定することで液面を移動させる。

4. 改良効果の確認

4.1 改良効果の確認

以上説明してきた改良の効果を確認するため、4.3節で実験結果との比較に用いる条件(海底勾配 1/200, 造波板の振幅 $e=0.35$ m, 周期 $T_m=40$ s, 地形形状は図-9)で、改良前コード (FRESH) と新しいコード (FRESH-FV) それぞれで鉛直二次元解析を行い比較した。ただし、FRESHでは斜面を表現できないため、階段状のものに置き換えて計算した。波を発生させてから 83 秒後の波先端付近の液面形状を FRESH で計算したものを図-5 に、また、FRESH-FV で計算したものを図-6 に示す。

両図の津波先端部での底面を這うベクトルの向き、先端部空間波形などから、改良により、遡上の様子が適切に表現できるようになったことが分かる。

4.2 非線形長波理論に基づく解析との比較

一様勾配 (1/40) をもつ海底形状に津波波形を入力させたときの浅海での伝播及び陸上遡上現象を対象にして、FRESH-FV を用いた鉛直二次元解析および非線形長波理論に基づく解析法 (非線形長波コードとする。波先端の処理には岩崎・真野 (1979) による方法を用いている。) による一次元解析を行い結果を比較した。

入力波形 (図-7 参照) は最大水深が 3,000 m で、大陸棚が汀線から 50 km 程度張り出している海底地形を想定して津波の平面二次元伝播計算を行い、水深 10 m で抽出した水位変動である。計算対象領域は波源域を含めた $270 \text{ km} \times 201.6 \text{ km}$ をとし、波源の規模はモーメントマグニチュードで 8.0 とした。平面二次元伝播計算は後

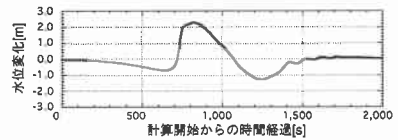


図-7 津波入力波形

藤ら (1982) の方法にならひ非線形長波理論に基づく二次方程式を用い、水深が浅くなるに従って格子間隔を 1/3 ずつ (1800 m, 900 m, 300 m) 細かくした。

このようにして求めた波形を $x=0$ の位置で水位変形として与えて津波を入射させた。

波面形状の時間変化の比較を図-8 に示す。同図より 1) 水深が十分ある領域では両者の違いがあらわれないこと。2) $T=820$ 秒, 860 秒の比較では、FRESH-FV では滑らかに遡上しているが、非線形長波コードは波形の切り立ちが見られ、FRESH-FV より遡上高が小さくなることなどが分かった。

このことから、FRESH-FV の解析結果は、水深が深い部分では非線形長波コードと同等の精度で計算され、波先端付近では非線形長波コードよりも自然な遡上現象を再現していると言える。

4.3 津波実験との比較

FRESH-FV の再現精度を検証するため、1983 年に発生した日本海中部地震津波の調査を目的に行われた津波実験結果 (谷本ら, 1983) と比較した。

実験は港湾技術研究所が所有する津波水路 (長さ 163 m, 幅 1 m, 深さ 1.5 m) で行われ、模型床は能代海岸及び男鹿半島における深浅測量図および海図をもとに、水深 5 m から陸側を 1/20 の勾配とし、それより深い大陸棚上面領域を 1/200 (能代海岸想定) にしたものと 1/50 (男鹿半島想定) としたものが用いられた。(図-9 参照)

津波の変形の様子は、流れ方向に配置された 8 本の容量式波高形で同時計測し、遡上高は目視によって計測されている。(波高計の配置を図-9, 表-1 に示す)

a) 波形の比較

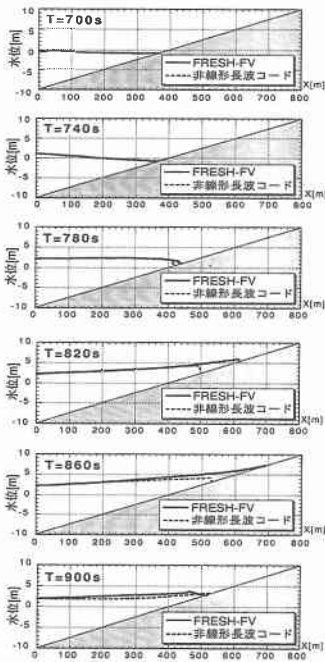


図-8 FRESH-FV と非線形長波理論に基づく解析法との比較

各計測点における水位記録が得られている能代海岸を想定したケース (海底勾配 1/200) および男鹿半島を想定したケース (海底勾配 1/50) で、造波板の振幅 $e=0.35$ m, 周期 $T_m=40$ s の鉛直二次元計算を行い、波形変化を実験と比較したのが図-10, 図-11 である。造波板の動きを計算上で模擬するため、造波板の振幅および周期から移動速度の時間変化を求め造波板中心位置の流速値として与えた。

両図から、1) 各点の水位変化を精度よく再現できていること、2) 波峰の分裂や反射波の挙動も再現できていることが分かる。

また、能代海岸を想定したケースの比較では、測点 S での第 1 波の波高の計算結果が実験結果より大きくなっているが、これは沖合いでの第 1 波の波高の違いが水深が浅くなるにことにより増幅されたためと考えられ、沖合いでの水位変化を実験と一致させることができれば、測点 S での波高も一致すると思われる。

b) 遡上高の比較

港湾技研の遡上高計測結果と比較するため、能代海岸を想定したケース (海底勾配 1/200) および男鹿半島を想定したケース (海底勾配 1/50) で、造波板の片振幅 e と周期 T_m を幾種類か変化させ種々の津波を発生させる鉛直二次元解析を行った。

沖合いでの峰高と第一波の遡上高の関係を求め、実験

値と比較したのが図-12 および図-13 である。ここで、沖合いでの峰高は測定点 H または H' で計測した値を用いた。

計算結果と実験結果の勾配はほぼ一致し、FRESH-FV が遡上高を精度よく求められることが分かる。

また、本コードが遡上高を精度よく解析していることから、図-8 より推察すると、従来の非線形長波理論と津波先端部処理に基づくモデルでは、津波遡上高を過小評価してしまう可能性があることが分かる。

5. おわりに

以上説明してきたように、海岸での津波の遡上・引き現象を精度よく再現できる解析コード (FRESH-FV) を開発するとともに、他の解析手法や実験結果との比較のための計算を行った。その結果、一様海底勾配での津波

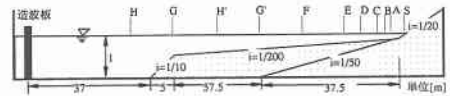


図-9 実験水路の概要図

表-1 各水位計測点と造波板中心との距離

計測点	H	G	H'	G'	F	E
距離 [m]	29.1	42.0	68.25	88.25	97.0	112.0
計測点	D	C	B	A	S	
距離 [m]	124.5	130.75	134.0	135.5	137.5	

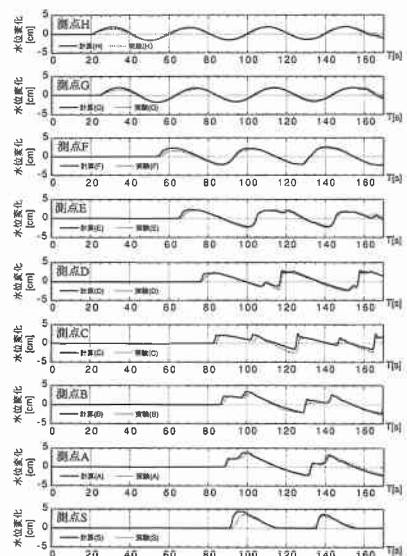


図-10 水位変化の比較 (能代海岸)

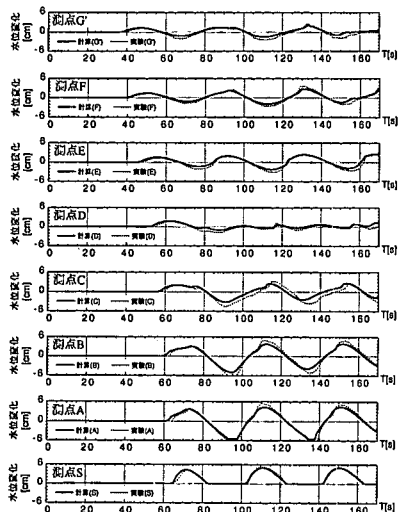


図-11 水位変化の比較 (男鹿半島)

を対象に本コードによる解析結果を従来の非線形長波理論に基づいた解析結果と比較では、本コードでは自然に近いと考えられる遡上波形が計算できること、運輸省港湾技術研究所で行われた実験との比較では、複数の海底地形が異なる実験ケースとの比較においてともに波峰の分裂や反射波を含めた津波の浅水変形や遡上高を精度よく再現できることが分かりコードの妥当性および信頼性が確認された。

今後は、開発したコード (FRESH-FV) を、他の海岸水理現象への適用を試みることによって改良を重ね、実際の海岸形状や海岸構造物形状を考慮して三次元沿岸流動解析を行うことのできるコードへと発展させる予定である。

参 考 文 献

米山 望・守屋祥一 (1995): VOF 法を用いた自由液面の数値解

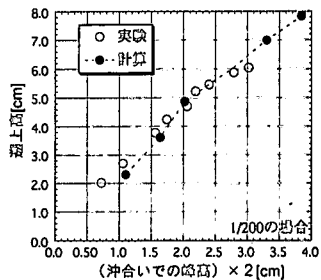


図-12 遡上高の比較 (能代海岸)

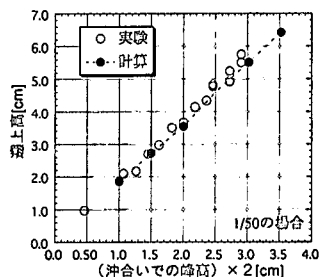


図-13 遡上高の比較 (男鹿半島)

析手法, 水工学論文集, 第 39 巻, pp. 373-378.

米山 望・角湯正剛 (1996): 自由液面解析コード (FRESH) の

開発—3次元化と並列化—: 電研報告 U 95063.

礒山 勉・鹿島遼一・阿部宣行 (1991): 傾斜堤周辺の波動場解析へのポラスモデルの適用性, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 546-550.

岩崎敏夫・真野明 (1979): オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 70-74.

後藤智明・小川由信 (1982): Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科, 52 p.

谷本勝利ら (1983): 1983 年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港湾技研資料 No. 470.

Hirt, C. W. and Nichols, B. D. (1981): Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, Journ. of Computational Physics 39, 201-225.