

1993年北海道南西沖地震津波における 局所遡上の数値解析

米山 望¹・松山昌史¹・田中寛好²

¹ 正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 (270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

² 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 (270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

1993年に発生した北海道南西沖地震津波は、奥尻島藻内地区において31.7mの痕跡高を記録した。しかし、31.7mを記録した地点近傍の痕跡高は23-25m程度であったため、局所的な原因により一部だけ高く遡上したと考えられる。この現象を再現し、原因を解明するため、当所で開発した自由液面解析コード(FRESH)を用いて藻内地区での遡上現象を解析した結果、以下のことが分かった。1) 解析された津波挙動は水理実験結果とよく一致する。2) 最大遡上高の解析結果は痕跡高と定量的によく一致する。3) 局所的な遡上は、ポケットビーチと津波来襲方向の傾き、最大遡上高が発生した谷付近の形状および波形勾配の大きさが要因となって発生したと推察される。4) 遡上域では、水位が上昇している間、鉛直流速が大きく、その大きさは鉛直方向に様ではない。

Key Words : tsunami runup, Hokkaido Nansei-oki earthquake, numerical analysis, Monai

1. はじめに

わが国の原子力や火力発電所は、冷却水の取放水や燃料の輸送搬入等を考慮して海岸線に建設される。そのため、発電所の設計に当たっては、取放水施設や外郭施設が安定性を保ち本来機能と環境への影響抑制が果たせるように波浪・津波・海浜変形・温排水拡散など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。その中でも地震時の津波に関しては、特に原子力発電所において、水位上昇と水位低下が安全上の重要機器や安定取水に及ぼす影響を慎重に検討しておく必要がある¹⁾。

地形がとくに複雑とはいえない海岸域での津波による水位挙動については、従来の非線形長波理論に基づく平面二次元数値計算モデルが適用されることが多い。しかし、北海道南西沖地震津波の際、最高痕跡高31.7mを記録した奥尻島藻内地区での周囲と比較して局所的に高い遡上(局所遡上)を数値計算で再現できた例は過去にはない。これはこの地点が小規模なポケットビーチに面した急勾配谷状地形(後述)を有しているためと考えられる。

このため、こうした複雑地形での遡上・引きも再現できる数値解析モデルを開発しておくことは、現在の標準的な津波評価法の適用拡大に寄与するとともに、既往津波においてまれに見られる特異な痕跡高を局地地形特性と津波特性の両面から再検証する上でも大いに役立つものと考えられる。

北海道南西沖地震津波の藻内地区における挙動の再現計算例を表-1に示す。同表はYehら²⁾がまとめたものに若干の追加を行ったものである。同表中で唯一、Titov・Synolakis³⁾は非線形長波理論を独自の方法で数値計算を行い、奥尻島の最大遡上高を再現しているが、この数値解析に使用された地形データの最小格子幅は50mである。ポケットビーチに面した急勾配谷状地形を再現するには明らかに荒いため、物理現象として再現できたかどうかについて疑問が残る。このように、この最大遡上高分布を再現した妥当なモデルはない。

当所では、水面の挙動を精度良く解析することのできる二・三次元自由液面解析コードFRESH^{8),9)}を開発している。これは、Navier-Stokes方程式を基礎式とする非圧縮性流体乱流解析を直交座標系上で行う解析コードであり、水面の計算法にVOF法¹⁰⁾を用いている。また、FRESHを海岸地形など直交座標で表しきれない地形形状に対応できるように改良して、日本海中部地震津波を対象とした鉛直二次元解析を行い、水理実験との比較を通してその妥当性を検証している¹¹⁾。

本論文は、北海道南西沖地震に伴う奥尻島藻内地区での局所的な津波遡上現象の再現および原因解明を三次元自由液面解析コードFRESHを用いて行ったものである。FRESHにより最高水位分布のみならず詳細な時系列的遡上挙動についても適切に再現できていることを確認するために、痕跡高との比較に加えて無歪

表一 1 北海道南西沖地震の解析例

著者	基礎方程式	数値計算法	最大格子幅	最小格子幅	最大津波高	遡上計算
Titov,Synolakis ³⁾	非線形長波理論	特性曲線法 (有限差分法)	450m,150m	50m	29.7m	あり
Tanioka,Satake ⁴⁾	非線形長波理論	有限差分法	450m	450m	10.5m	あり
	同上	同上	150m	150m	13.5m	同上
Myers,Baptista ⁵⁾	非線形長波理論	有限要素法	1000m	21.48m	15.5m	あり
高橋ら ⁶⁾	非線形長波理論	有限差分法	450m	50m	15m	なし
山下ら ⁷⁾	非線形長波理論 + 拡散項	有限差分法	1800 m (EW) 1350m(NS)	600m(EW) 450m(NS)	7.5m	なし

み模型実験で得られた津波挙動画像との比較も行った。また、藻内地区における入力波形および周辺海底地形を現実の条件より変化させた解析も行うことにより、30mを越える局所遡上の発生原因の解明を試みた。

2. 数値解析の概要

はじめに、本解析の基礎方程式と水面形状の取り扱いを示したあと、複雑地形を取り扱うための基礎方程式の変形、流体体積の移動計算法および解析の流れについて説明する。

(1) 基礎方程式と水面形状の取り扱い

本解析で用いる基礎方程式は以下に示すものである。

・連続式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

・運動方程式 ($i = 1, 2, 3$)

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

・乱流エネルギー ($k = \overline{u'_i u'_i} / 2$) 方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (3)$$

・乱流エネルギー散逸率 (ε) 方程式

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

ここで、 \bar{u}_j [m/s]: 平均流速の各方向成分、 u'_j [m/s]: 流速変動の各方向成分、 ρ [kg/m³]: 流体密度、 p [N/m²]:

圧力、 G_i [m/s²]: 単位質量あたり外力の各方向成分、 ν [m²/s]: 動粘性係数であり、 i, j, k について各方程式の同一項内で2度同じ記号が現れるものに対しては、1, 2, 3にわたり総和を取るものとする。また、レイノルズ応力 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ と渦動粘性係数 ν_t は以下のモデル化式

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{i,j} \quad (5)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

で評価する。ここで、 $\delta_{i,j}$: クロネッカーのデルタである。また、 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon 1} = 1.45$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$ とした¹²⁾。

つぎに、水面形状の取り扱いについて説明する。本研究において水面形状の取り扱いに用いているVOF法では、解析領域中の流体の配置を、各計算セルの流体充填率 F_0

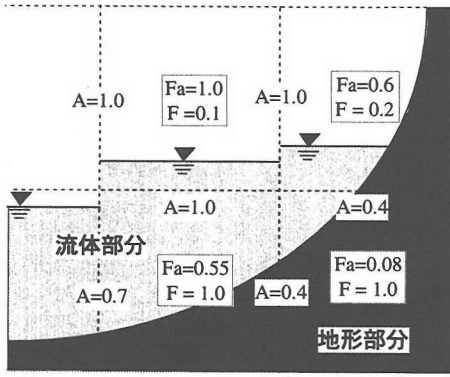
$$F_0 = \frac{\text{計算セル内の流体体積}}{\text{計算セルの体積}} \quad (7)$$

で表し、運動方程式により求めた流速値により流体を移動させ、結果として水面形状が変形する。

セル間の流体の移動は、隣接する計算セル間で行われ、計算セルの境界で定義される流速の風上側に移動領域を設定してその中に含まれる流体を風下側に移動させる。

(2) 基礎方程式の変形

三次元の複雑地形形状下での流れを直交座標系を用いて表現するため、計算セル内に地形部分を存在させた流体解析(ここでは気体を扱わないため、海水部分を流体と呼ぶ)を行う。具体的には、榊山ら¹³⁾がポラスモデルで行っているように、解析領域内の地形形状を各セルの空隙率およびセル表面(境界面)の開口率によって表し、それらを考慮して基礎方程式を積分



図一 流体配置の表現法



図二 積分の説明図

した式を用いて解析する(図一参照)¹¹⁾。ここで空隙とは計算セル内の地形以外の部分、すなわち流動可能部分とする。

空隙率 Fa 、開口率 A はそれぞれ、

$$Fa = \frac{\text{計算セル内の空隙体積}}{\text{計算セルの体積}} \quad (8)$$

$$A = \frac{\text{計算セル境界面中の空隙面積}}{\text{計算セル境界面の面積}} \quad (9)$$

と定義される。また、計算セル内の地形を考慮する場合、流体充填率 F は、

$$F = \frac{\text{計算セル内の流体体積}}{\text{計算セル内の空隙体積}} \quad (10)$$

と定義される。

次に、複雑地形を考慮した連続式(式(1))および運動方程式(式(2))の積分形を示す。

a) 連続式

解析領域中に設定したコントロールボリュームを V (その体積も V)、流体領域を Ω とする(図二参照)。式(1)を $V \cap \Omega$ (コントロールボリューム V に含まれる流体領域)で積分し、ガウスの発散定理を適用すると、

$$0 = \iiint_{V \cap \Omega} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} dV = \iint_{\partial(V \cap \Omega)} \bar{u}_j n_j dS \quad (11)$$

と書ける。ここに、 $\{n_j\}$ は dS の法線ベクトルの要素である。面積分範囲は $\partial V \cap \Omega$ (コントロールボリューム内の流体領域とコントロールボリューム外の流体領域の境界面)と $V \cap \partial \Omega$ (コントロールボリューム内の流体領域と地形領域の境界面)に分けられ、 $V \cap \partial \Omega$ では法線方向流速が0であるから連続方程式の積分形は、

$$\frac{1}{V} \iint_{\partial V \cap \Omega} \bar{u}_j n_j dS = 0 \quad (12)$$

となる。

b) 運動方程式

式(2)をコントロールボリューム V 内の流体領域で積分すると、運動方程式は

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{1}{FaV} \iint_{\partial V \cap \Omega} \bar{u}_i \bar{u}_j n_j dS \\ = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\nu}{FaV} \iint_{\partial V \cap \Omega} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} n_j dS \\ + \frac{\nu}{FaV} \iint_{V \cap \partial \Omega} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} n_j dS - \frac{\partial \bar{u}'_i \bar{u}'_j}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (13)$$

となる。ここで、移流項、粘性項は連続式と同様に積分し、その他の項はコントロールボリューム内で一様な値を取ると仮定して積分している。

(3) 数値解析の方法

解析は式(12)と式(13)および式(3)、式(4)を有限差分法に基づいて離散化し、SIMPLE法に基づいて行う。ここでは、地形を考慮した流体体積の移動法と解析の流れについて簡単に説明する。

計算セル内に地形を考慮して、セル間の流体の移動を次のようにした。計算セル内の地形配置が水平な場合、流体が移動する境界面面積を S 、風上側の流体充填率を F 、空隙率を Fa 、風下側の空隙率を Fa_e とすると、セル間の移動量 Q は風上側の空隙率 Fa が風下側より大きい場合(図一3a)、

$$Q = U \Delta t \cdot \{F \cdot Fa - (Fa - Fa_e)\} S$$

となる。また、風上側の空隙率が小さい場合(図一3b)、

$$Q = U \Delta t \cdot F \cdot Fa \cdot S$$

となる。

解析の流れはSIMPLE法のアルゴリズムに乱流および水面変動の評価を加えた以下のものとした。

- i. 時刻 t ですべての物理量の値が既知とする。
- ii. 式(6)を用いて、渦動粘性係数 ν_t を求める。
- iii. 式(3)および式(4)の離散化式から $t + \Delta t$ の乱流エネルギー k および乱流エネルギー散逸率 ϵ を求める。

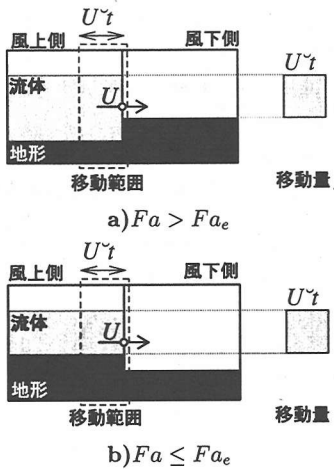


図-3 流体体積の移動法

- iv. 運動方程式(式(13))の離散化式から $t + \Delta t$ での流速 \bar{u}_i の推定値を求める。
- v. 連続式の誤差 D を求める。
- vi. 誤差 D の最大値が許容値以下の場合、流速 \bar{u}_i の推定値を真値として次に進み、そうでない場合、流速推定値・圧力を修正し v. に戻る。
- vii. 流体を移動させ、流速、圧力の境界条件を設定して、ii. に戻る。

3. 北海道南西沖地震津波への適用

(1) 北海道南西沖地震津波の概要

1993年7月12日22時17分に北海道南西沖で発生した地震は、世界的に遡上高では20世紀最大、国内における人的被害では戦後最大の津波を伴った。

大きな被害を受けた奥尻島では、藻内地区、青苗地区、初松前地区とその周辺では20m程度かそれ以上の痕跡高を示した。特に、藻内地区は地震津波が直撃し局所的に30mを越える痕跡高つまりこの津波の最大遡上高を示した¹⁴⁾。

この周囲に比較して極局所的に大きな痕跡高を生じたことが、北海道南西沖地震津波における藻内地区遡上の大きな特徴である。著者の一人も参加した首藤の調査¹⁴⁾の結果、最大遡上高が発生した海岸は延長250mのポケットビーチで、その南よりが急勾配谷状地形となっており、急勾配斜面(崖)に入口幅50m程度の二股の谷が刻まれていること(図-4および図-5参照)、痕跡高はその北側の谷奥で25.3m、南側の谷奥で31.7m、入り口付近の崖で23mであること、南側の谷を除いたこのポケットビーチの痕跡高分布の平均値



図-4 藻内周辺の航空写真(国際航業撮影)



図-5 谷周辺の航空写真(国際航業撮影)

は約23.9mであり、南側の谷奥の痕跡高はこの平均値の約1.3倍と異常に大きいことが分かっている。

(2) 水理実験の概要

同地震津波の藻内地区における局所的な遡上のメカニズムを解明するため、当所が所有する大型造波水路(長さ205m×幅3.4m)を用いて、1/400スケール無歪みの津波再現実験(時間縮尺はFr相似則により1/20)を行った¹⁵⁾。(なお、本文中および図-6を除く図中の長さ、時間はすべて現地換算値で示す。)

実験地形は、沖合から水深50mまでを一様勾配の組み合わせ、水深50mから遡上域までは5.6mピッチの詳細な地形データをなめらかに内挿して作成した三次

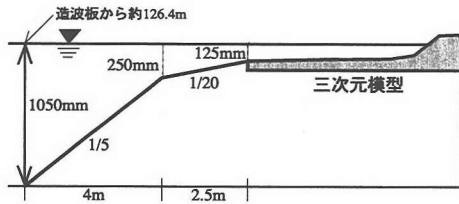


図-6 実験地形縦断面

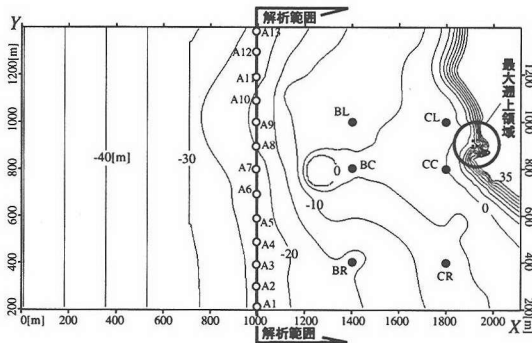


図-7 三次元模型平面図

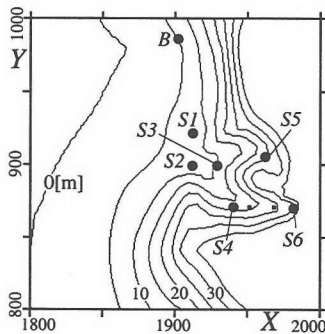


図-8 三次元模型平面図(最大遡上の谷付近)

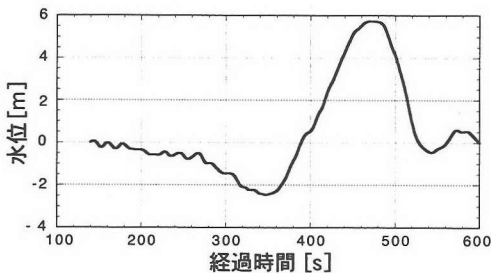


図-9 $X = 0m$ での水位時間変化

元模型とした。図-6に実験地形の縦断面図、図-7に模型の平面図を示す。また、図-8に最大遡上の谷付近の平面図を示す。

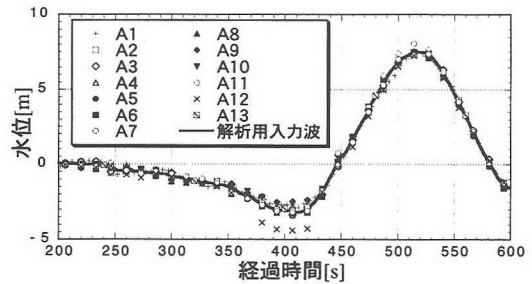


図-10 $X=1000m$ での水位時間変化と解析入力波形

津波再現実験の造波信号は波源も含めた数値計算(非線形長波理論に基づく平面二次元数値解析)の結果を元に作成した。波源の断層パラメータは東北大学の提案した DCRC26⁶⁾を用い、藻内沖の水深 50m 地点の水位変動を取り出し、ポケットビーチ全体の遡上高が実測値(23m 程度)に近づくように振幅を増幅させた。図-9は $X=0$ (図-7参照)において測定された水位例である。

6回の実験の結果、その最大遡上高の平均を取ったところ 35.83m、またポケットビーチ中央の最大遡上高の平均が 24.17mであった。その比は $35.83/24.17 = 1.49$ と、南側の谷の遡上高が異常に大きいことを示しており、局所遡上の特徴再現に成功したといえる。

(3) 解析条件

a) 解析用入力波

上記の津波再現実験では波高計を用いて水位時間変化を計測した。 $X=1000m$ 地点(図-7の A1~A13)の計測結果を図-10に示す。

同図から分かるように、全 13 地点の水位はほぼ同様に時間変化している。そこで、解析範囲を $X=1000m$ の位置から陸上部までとし、 $X=1000m$ において、13 点の水位変化を時間ごとに平均した波を入力した(図-10の解析用入力波)。また、以下の説明で使用する経過時間は図-10の経過時間を基準とする。

b) 解析用地形メッシュ

解析用地形は水理実験の三次元模型と同じ地形データを利用して作成した。メッシュ分割は、地形データをそのまま用いた均等メッシュと、最大遡上部とその周辺をさらに細かくした部分詳細メッシュを作成し、おもに、部分詳細メッシュで解析を行った。

均等メッシュの水平方向メッシュ分割は、地形データで得られている標高がセルの中央になるように 5.6m 間隔とし、部分詳細メッシュの水平方向メッシュ分割は、均等メッシュからさらに X 方向は 1831.2m から 1988m までの区間、 Y 方向は 840.0m から 991.2m ま

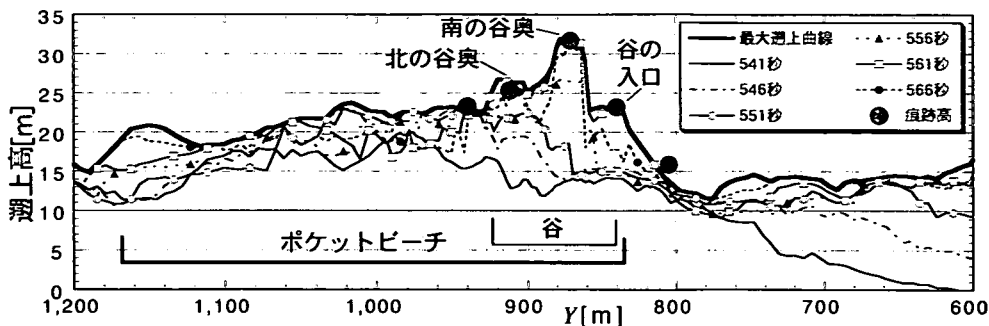


図-11 遡上曲線および現地痕跡高

での区間を半分の2.8m間隔とした。鉛直方向メッシュ分割はともに2m間隔とした。メッシュ数は、部分詳細メッシュを適用した場合で2,161,250メッシュ(=X方向250×Y方向247×鉛直方向35)となった。

計算セル内の地形面は水平とし、計算セルの空隙率 Fa を次式に基づいて計算した。

$$Fa_{i,j,k} = \min\left(\frac{Z_{k+1} - Z_{p_{i,j}}}{Z_{k+1} - Z_k}, 1.0\right) \quad (14)$$

ここで、 Z_{k+1} 、 Z_k は各計算セルの上端および下端の標高、 $Z_{p_{i,j}}$ は地形データから得られた標高、 $\min()$ は小さい値を選択する関数である。なお、部分詳細メッシュの作成において、セル中央の標高が得られていない場合は、周囲から内挿して求めた。

c) 境界条件

流速境界条件は実験水路の側面($Y=200m, 1400m$)および底面をフリースリップとした。 $X=1000m$ の入射境界では、水位の時間変化が図-10と同じになるように境界外側の圧力値を調整した。また、乱流境界条件は、流体セル($Fa \neq 0, F \neq 0$)が底面で地形セル($Fa = 0$)に接する場合、地形セルの乱流エネルギーを0、乱流エネルギー散逸率を流体セルと等しいとした。また、流体セルが上面で空セル($Fa \neq 0, F = 0$)に接する場合、空セルでの乱流エネルギーを流体セルの8割、乱流エネルギー散逸率は流体セルと等しいとした。

(4) 解析結果の比較と考察

解析により得られた遡上高を痕跡高と比較するとともに、最大遡上した谷付近の水面変形を津波再現実験の結果と比較することにより解析結果の妥当性を確認した。また、定点の水位・流速変化データ等を用いて解析結果を考察した。

a) 最大遡上高の現地痕跡高との比較

図-11に遡上曲線および現地で観測された痕跡高¹⁴⁾を示す。遡上曲線は遡上高を各時間ごとにY-Z平面に

投影したものであり、同図には541秒～566秒間の5秒おきの遡上曲線および541秒～569秒間の1秒おきの遡上曲線の包絡線を最大遡上曲線として表示している。

同図から解析結果は、南の谷奥(31.7m)および北の谷奥(25.3m)や谷の入り口付近の崖(23.5m)における痕跡高を精度良く再現した。時間的には、はじめポケットビーチ背後の崖($Y=950m \sim 1000m$)の遡上高が高くなり、ここでの最大遡上高は23m程度となる。その後、谷の方向に向かい、561秒で最大遡上になることが分かった。

b) 谷周辺における水面変形の実験との比較

津波再現実験で流れの撮影に用いたシステムは、250枚/秒の高速度カメラで撮影し、15枚/秒の動画として出力される。一方、実験時間は現地時間の1/20であるため、動画の1秒を現地の1.2秒(=20×15/250)として、実験結果と解析結果を同期表示した動画を作成して両者の時間的変化を比較した。そのスナップショットを図-12に示す。同図の表示範囲は図-8と同じである。

実験結果に比べて早い時間に谷の入り口に到達している点は異なるものの、540秒で北側(画面左側)にある盛り上がりがあり、ポケットビーチに沿って南(右側)に流れ、それに伴い谷に波が流入する様子や、南側、北側の谷を遡上する様子は時間的にも実験結果とほぼ同様の挙動を解析することができた。特に、南に向かう流れの一部がポケットビーチ南側の谷の南斜面に捕らえられ、方向を変えて谷奥に進んでいくこと、北側の谷へは南側の谷に向かう流れが間接的に流入しているため、南側に比べて遡上高が小さくなることなども実験と一致することが分かった。

このように実験結果と挙動がほぼ一致すること、遡上高が痕跡高と一致することを考え合わせると、本解析結果は同地震津波の局所的な挙動をかなりの精度で再現できていると考えられ、本解析法の妥当性が明らかになった。

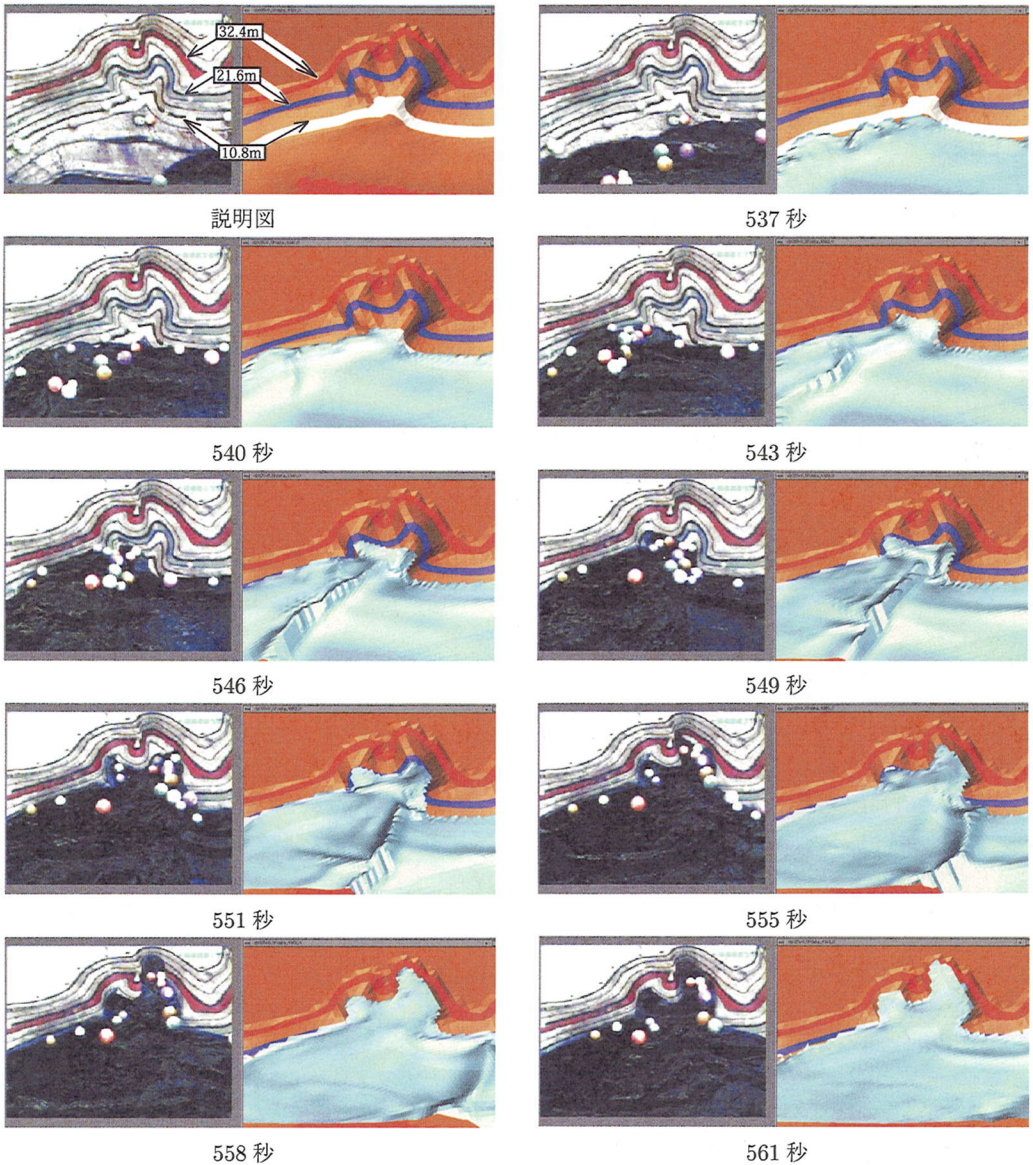


図-12 谷周辺の水面変形の実験との比較

また、これらの比較により、ポケットビーチ南側の谷の入り口（特に南斜面）の形状が、局所的な遡上の直接的な原因となったと推察される。

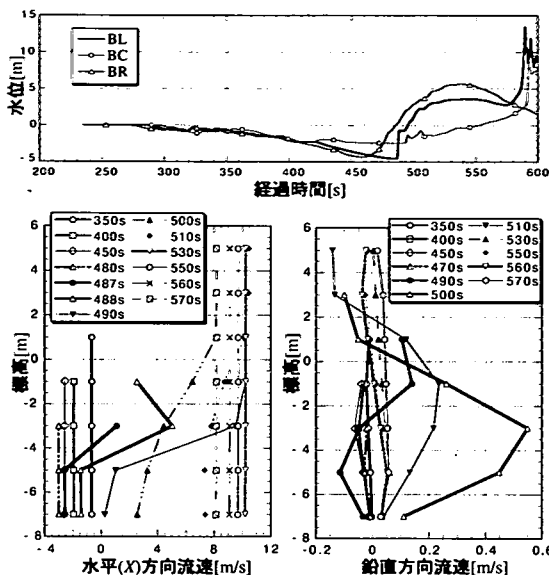
c) 定点での水位、流速変化の考察

図-7および図-8に示したBL, BC, BR, S2地点での水位時間変化とBL, S2における流速の時間変化について考察した。

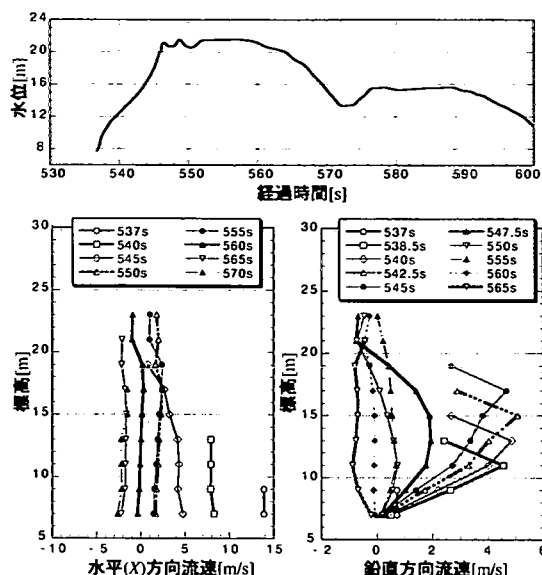
図-13にBL（標高：-6.33m）、BC（標高：-2.41m）、BR（標高：-15.40m）地点の水位変化とBL地点の水平（X）および鉛直方向流速の時間変化を示す。

同図からBL地点の水平（X）方向流速は水位変化に対応して、470秒までは負の値を持ち、その後反転して最大10.3m/s程度（510秒頃）の流速を持つ。鉛直分布はおおむね一様であるが、流速値が負から正に反転する過程（487～510秒）で、上層と下層で流速に顕著な鉛直分布が形成される。特に488秒では下層は引き波、上層は押し波になっており、この時、水位変化の図から分かるようにBL地点の水位が急上昇している。

また、鉛直方向流速の絶対値は水平（X）方向に比較して小さいが、490～510秒では、水平（X）方向と同



図一 13 BL,BC,BR 地点の水位と BL 地点の流速の時間変化



図一 14 S2 地点における水位および流速の時間変化

様に鉛直方向に顕著な分布がある。これは、水位の最大低下時から急激に水位上昇が生ずる際の流速の複雑な鉛直分布が反映しているためと考えられる。

S2 (標高: 7.71m) 地点の水位および各方向流速の時間変化を図一 14 に示す。両地点の水位は、540 秒～550 秒で上昇し、570 秒で低下、580 秒から再び上昇した。最大遡上時間が 561 秒であるから、前半の山は津波本体、後半の山は谷を遡上した波が戻ってきたものである。水平 (X) 方向の流速は、津波到達時点で 14m/s 程度であり、水位の上昇とともに流速が小さくなる。また、鉛直方向に顕著な分布は見られない。鉛直方向の流速は、水位が上昇している間、鉛直上向きの値を持ち、その鉛直分布は水面付近や底面付近が小さく、中央部に最大値を持つ。これは津波先端部付近の水粒子の運動について、鉛直方向の加速度が本体部分より大きく、有意であることを示している。さらに、津波の先端部付近において、この分散効果によって水位が上昇した可能性がある。

以上から、地形の影響を受けて複数方向の波が交差する場合や水位が急激に上昇するような場合は、流れの三次元性が強いいため、津波挙動を精度良く再現するには、三次元解析を実施する必要がある。

(5) 局所遡上を引き起こした原因の検討

前節の解析結果をさらに分析するとともに、入力波形や海底地形を変化させた解析を行うことにより局所遡上の原因を検討した。前節の解析を基準ケースとして、基準ケースに用いた入力波形を基準入力波形、地形を

基準地形とする。

a) 基準ケースでの津波挙動

基準ケースにおいて図一 15 に解析された水際線位置の時間変化を示す。津波はまず、ポケットビーチ北端のホヤ石岬 (Y=1200m 地点) に到達し (535 秒)、その後、津波の進行とともに、北から南へ順次到達し (540 秒～550 秒)、560 秒頃に最大遡上した南の谷に達した。ホヤ石岬に到達して谷に向かう途中である 545 秒における無縁島を含むポケットビーチ前面の流れを図一 16 に示す。流速ベクトルは鉛直方向に平均したものである。同図から津波がホヤ石岬に到達したあとはポケットビーチの地形形状に沿って北から南に流れ谷に向かうこと、沖合では無縁島の両側を回り込んだ津波がポケットビーチの方向に向かうことが分かった。

b) 入力波形勾配の影響

基準入力波形は波形勾配が大きいことに特徴がある。そのため、より小さい波形勾配を持つ入力波形による解析を行った。用いた時間波形は基準入力波形の全体つまり津波周期を 1.5 倍にした (全体引き延ばし) 波形と、立ち上がりの部分のみを時間的に 1.5 倍にした (部分引き延ばし) 波形とした (図一 17 参照)。

最大遡上曲線の比較を図一 18 に示す。同図より、波形勾配が小さくなると全体的に遡上高が低くなり、最大遡上高さも 30m を越えないことが分かった。

また、図一 19 に BL, S2 地点の水位変化を示す。同図から入力波の周期を 1.5 倍にしたケースは、水位変化のパターンが基準ケースと異なり、S2 地点では水位のピークが基準ケースより低くなること、部分引き延

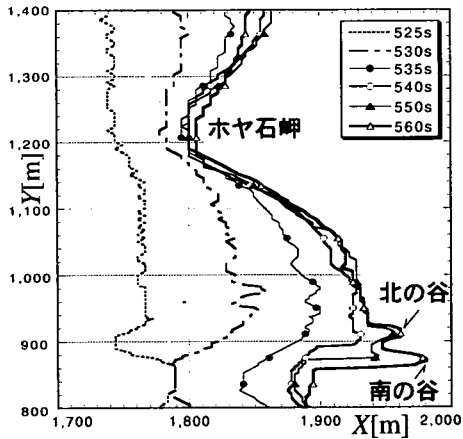


図-15 水際線位置の時間変化

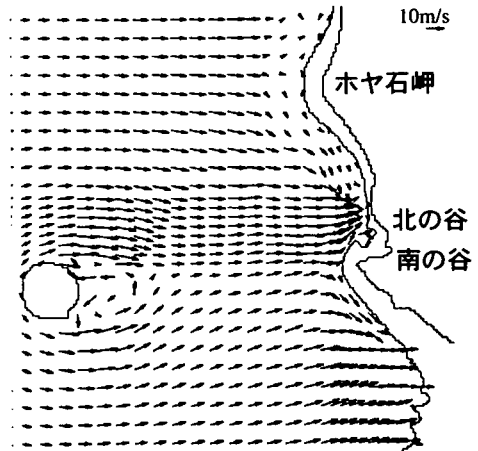


図-16 ポケットビーチ前面の流れ (545 秒)

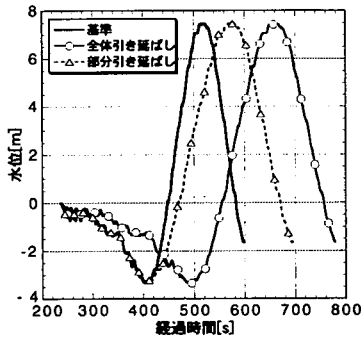


図-17 引き延ばした入力波形

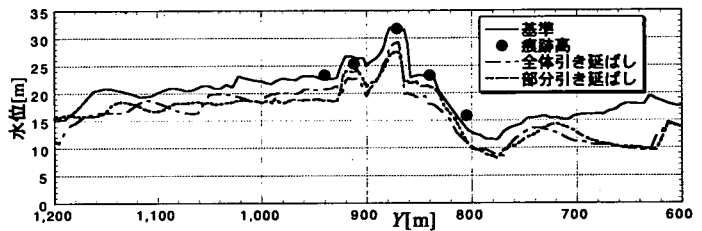


図-18 入力波形勾配が最大遡上曲線に与える影響

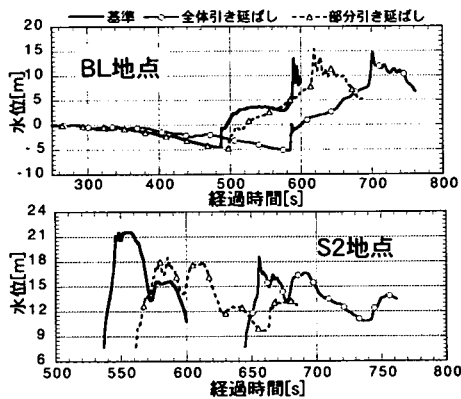


図-19 入力波形勾配が BL,S2 地点の水位変化に与える影響

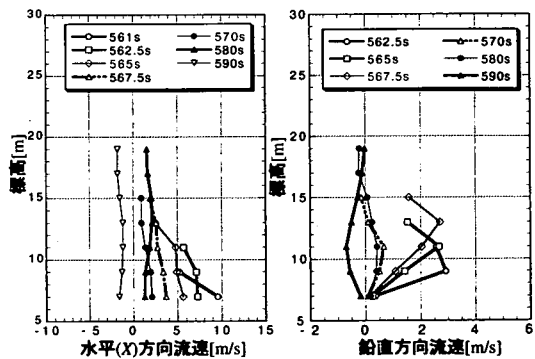
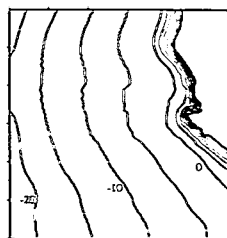


図-20 入力波形勾配が S2 地点の流速の時間変化に与える影響 (部分引き延ばし)

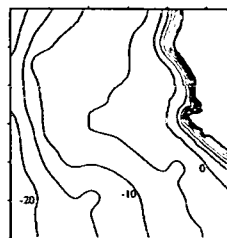
ばしについて S2 地点での流速の鉛直方向分布を図-20 に示す。同図と図-14 の比較から、周期を引き延ばしたことにより、水平方向、鉛直方向ともに流速が小さくなるのが分かった。

c) 周辺海底地形の影響

津波挙動と周辺海底地形との関係調べるため、周辺の海底を概ね一様勾配とした(一様勾配)地形と無縁島のみを取り除いた(無縁島無し)地形を用いて解析



一様勾配



無縁島無し

図-21 変更した解析地形

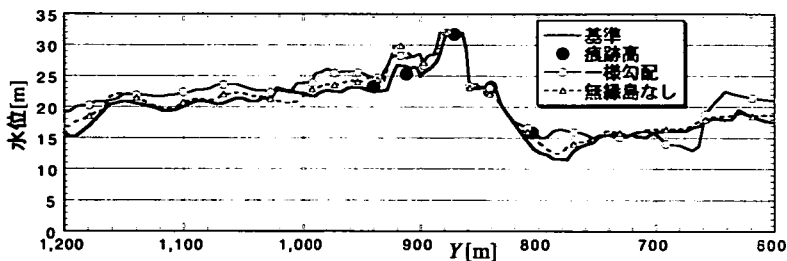


図-22 周辺海底地形が最大遡上曲線に与える影響

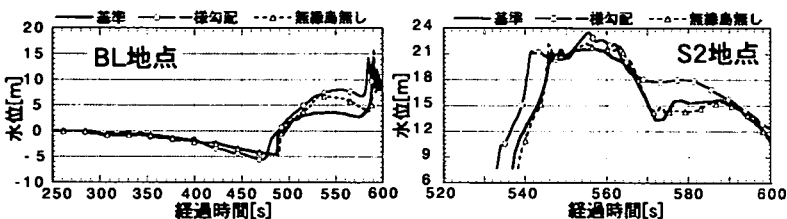
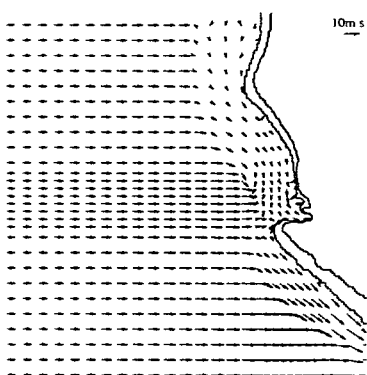
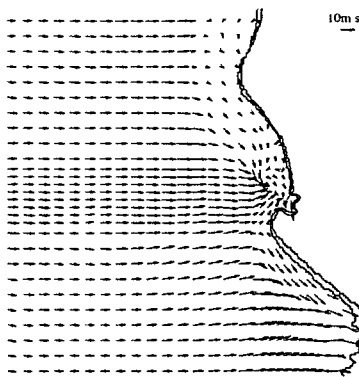


図-23 周辺海底地形がBL,S2の地点水位変化に与える影響



一様勾配



無縁島無し

図-24 周辺海底地形がポケットビーチ前面の流れに与える影響 (550 秒)

し、基準地形を用いた解析結果と比較した(図-21)。

図-22に最大遡上曲線の比較結果を示す。同図から地形が変化しても最大遡上高は変化しないこと、地形を変更したケースでは北の谷での遡上高が基準よりも高く、谷を除くポケットビーチ背後の崖(Y=920m~1150m)では、一様勾配の遡上高が大きくなるのが分かった。

図-23にBL, S2地点の水位変化を示す。BL地点では基準地形が他の地形よりピーク水位が低い。S2地点では各地形とも水位変化の同様な水位変化を示し、基準地形と無縁島無しについては水位変化はほぼ同一となった。

図-24に550秒でのポケットビーチ前面の流れの

様子を示す。表示範囲は図-16と同じである。基準地形では無縁島を回り込むように流れていたが(図-16参照)、一様勾配では津波はほぼ直進し、無縁島無しでは若干ポケットビーチ方向に向かう流れとなった。このように地形を変更するとポケットビーチ前面での流れが異なるが、最大遡上高には影響がなかった。

d) メッシュ間隔に関する考察

最後に、均等メッシュで基準ケースの解析を行い、部分詳細メッシュの結果と比較した。均等メッシュは最大遡上高が発生した南の谷の谷幅の1/4程度の水平メッシュ間隔であり、部分詳細メッシュは谷近傍を中心に1/8程度である。部分詳細メッシュにおいて最大遡上高となった561秒の遡上曲線の比較を図-25に示す。

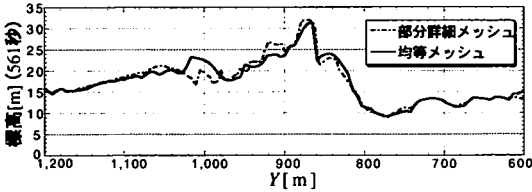


図-25 メッシュの違いによる遡上曲線の変化

同図から最大遡上高は、均等メッシュ、部分詳細メッシュとも同程度になっている。本研究では局所遡上現象を精度良く予測するため、他のすべて解析で部分詳細メッシュを用いたが、この比較結果を見る限り、最大遡上高については、均等メッシュでも十分再現可能であることが分かった。

4. おわりに

当所で実施した1/400縮尺の無歪み模型実験において現地の痕跡高を再現した入力波を用い、FRESHによる三次元津波遡上解析を実施した。得られた成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 三次元津波遡上解析の結果、①最大遡上が発生した谷の入り口や谷奥の遡上高は観測された痕跡高と定量的によく一致すること、②津波挙動は時間的、空間的にも水理実験結果とよく一致することが分かり、本解析結果は実際の津波遡上を適切に再現していると考えられる。
- (2) 入力波形および海底地形を変化させた解析を行って、局所遡上を引き起こした要因を検討した結果、局所的な遡上は、①ポケットビーチと津波来襲方向の傾きがポケットビーチに沿って南に向かう流れを引き起こしたこと、②谷の入り口が南に向かう流れを捕らえやすい形状であること、さらに③津波波形の勾配が急であったため遡上域における鉛直上向き流速が大きかったことなどの要因が重なって発生したことが分かった。一方、④最大遡上高に対する無縁島とその周辺の海底地形の影響は認められないことが分かった。

今後は、津波前面の勾配と地形特性の両方を加味し、平面二次元モデルの適用限界条件や三次元モデルのメッシュ間隔を定量的に評価し得る方法の開発が必要であると考える。

謝辞：本研究で対象とした藻内地区の地形データは東北大学の今村文彦教授よりご提供頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)電力土木技術協会編：火力原子力発電所土木構造物の設計—増補改訂版—, pp.154-173, 1995.
- 2) Yeh, H., Liu, P. and Synolakis, C.: Long-Wave Runup Models, *World Scientific*, Singapore, pp.403, 1995.
- 3) Titov, V. and Synolakis, C.: Numerical Modeling of 3-D Long Wave Runup using VTCS-3, Long-Wave Runup Models, *World Scientific*, Singapore, pp.242-248, 1995.
- 4) Tanioka, Y. and Satake, K.: Tsunami Runup on Okushiri Island, *World Scientific*, Singapore, pp.249-257, 1995.
- 5) Myers, E. P. and Baptista, A. M.: Finite Element Solutions of the Hokkaido Nansei-Oki Benchmark, *World Scientific*, Singapore, pp.272-280, 1995.
- 6) 高橋智幸, 首藤伸夫, 今村文彦, Modesto Ortiz: 津波を説明するための北海道南西沖地震断層モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.251-255, 1994.
- 7) 山下隆男, 高林努, 土屋義人: 北海道南西沖地震による津波と奥尻島青苗地区での津波の氾濫解析, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.231-235, 1994.
- 8) 米山望, 守屋祥一: VOF法を用いた自由液面の数値解析手法, 水工学論文集, 第39巻, pp.373-378, 1995.
- 9) 米山望, 角湯正剛: 自由液面解析コード(FRESH)の開発—三次元化と並列化—, 電中研報告U95063, 1996.
- 10) Hirt, C. W. and Nichols, B. D.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol.39, pp.201-225, 1981.
- 11) 米山望, 松山昌史: 自由液面解析コード(FRESH-FV)を用いた津波遡上解析, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.266-270, 1997.
- 12) Chen, C. J., 田中伸和: CHEN & TANAKAによる乱流モデルの基礎と応用, 構造計画研究所, pp.34-46, 1992.
- 13) 榊山 勉, 鹿島遼一, 阿部宣行: 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, 1991.
- 14) 首藤伸夫: 1993年北海道南西沖地震津波の痕跡高, 津波工学研究報告, 第11号, 1994.
- 15) Matsuyama, M. and Tanaka, H.: An experimental study of the highest run-up in 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake tsunami, *International Tsunami Symposium*, 2001.

(2001.6.28 受付)

NUMERICAL ANALYSIS FOR LOCALLY HIGH RUNUP OF 1993 HOKKAIDO NANSEI-OKI SEISMIC TSUNAMI

Nozomu YONEYAMA, Masafumi MATSUYAMA and Hiroyoshi TANAKA

Computer code (FRESH) was applied to a locally high runup phenomenon at Monai district in 1993 Hokkaido Nansei-oki tsunami. The results are summarized as follows. 1) The computed tsunami behaviors temporally and spatially agree well with an experiment result of 1/400 non-distorted scale-model. 2) The computed runup heights agree with tsunami marks including the maximum height (31.7m) at Monai district. 3) Main factors of the locally high runup are the steepness of tsunami wave, angle between coastline and tsunami attack direction and the configuration of the south valley. 4) In runup area, while water level rises, vertical velocity has large value that is not uniform in a vertical direction.