

近地津波の発生・伝播・遡上過程のシミュレーション手法の開発

Upgrade of the Dynamic Simulation Procedure for Near-Field Tsunamis

久保剛太¹・大町達夫²・井上修作³

Gota KUBO, Tatsuo OHMACHI, Shusaku INOUE

The 3-D dynamic tsunami simulation procedure developed by the authors takes into account the dynamic seabed displacement resulting from seismic faulting and acoustic effects of seawater. Some new techniques have been developed for upgrade of the existing procedure, which include the so-called nesting of the mesh size and extension for run-up to coastal areas. Practicality of the upgraded procedure has been successfully validated by, for example, simulation of the dynamic generation of a near-field tsunami followed by the propagation and run-up.

1. はじめに

従来の地震津波数値解析では、海底地盤の永久変位を津波初期波形として静的に海水面に与え、以降の伝播計算に長波近似を用いる 2 次元的手法が多用されている。

近地津波を対象とする場合、津波の波形や到達時間が断層破壊の時間関数や局所的なアスペリティの影響を強く受けるため、従来手法では津波を精度よく再現できないことがあり、大町・仲摩 (1997) や Ohmachi・Tsuikiyama・Matsumoto (2001) などにより動的津波解析手法が開発されてきた。この動的津波解析手法では、海底地盤と海水を弱結合系としてモデル化し、断層破壊に伴う動的地盤変位を海底に入力し流体部の基礎方程式に Navier-Stokes 方程式 (以下、NS 方程式と略記) を用いているので、津波の発生から伝播・遡上までの一連の過程を 3 次元的に一挙に解析できる可能性がある。ただし、現段階の動的津波解析手法では遡上部分の解析が不可能であるため、津波の発生機構から深海部での伝播、沿岸部での浅水変形と遡上などの一連の現象を、より現実 に即したモデルで高精度に解析するためには、同手法に移動境界条件とネスティング手法を付与して拡張し、これらの妥当性を検証する必要がある。これが、本研究の目的である。

2. 数値計算方法

本研究は既往の動的津波解析手法に基づき、地盤領域での地震動解析結果を流体領域での境界条件として時々刻々と入力することで津波の発生・伝播解析を行う。

本研究における、地盤領域の解析には半無限弾性体で

仮定し境界要素法を用いて動的地盤変位解析を行う。一方、流体領域の解析においては、長波近似式を用いず、NS 方程式と限定圧縮の質量保存式を用い、MAC 系統の手法を用いてこれらを差分法で解析する。また、自由表面の境界条件には式 (1) に示す運動学的条件から導かれる支配方程式 (高さ関数法) を用いている。

$$\frac{dH}{dt} + u \frac{dH}{dx} + v \frac{dH}{dy} = w \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 H は基準面からの水面高さ、 u , v , w は x , y , z 成分の流速を示す。

なお、流体計算のコードとしては、既往の動的津波解析手法でも用いられている Hirt ら (1975) が開発した SOLA-SURF コードを基本とし、これに改良を加えることで本研究の解析を行った。

3. 遡上計算に向けた拡張と検証

(1) 遡上計算方法

本研究が参考にした SOLA-SURF コードは遡上のような移動境界問題を扱うことができないことから、既往の動的津波解析手法では海岸を鉛直壁として処理していた。そのため、津波遡上を取り扱うことはできなかった。そこで、本研究では、遡上解析までを行うための改良を SOLA-SURF コードに加えることとした。

現在、流体数値計算手法での移動境界問題の取扱いとしては VOF (Volume of Fluid) 法 (Nichols・Hirt・Hotchkiss, 1980) などが主流となっているが、本研究では、NS 方程式を 3 次元に解くという計算負荷の観点や、既往の動的津波解析手法との接続などの観点から、比較的取り扱いが簡単な、高さ関数法を適用することとした。

具体的には遡上斜面部においてもあらかじめ仮想的に水膜を配置しておき、津波が押し寄せてくるまでは収束計算に加えず、波が押し寄せてきたら高さ関数法の式にしたがって水面位置を更新するという簡易的な手法を用

1 非会員 修(工) 気象庁 (研究当時 東工大 大学院生)
2 正会員 工博 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻
3 正会員 修(工) 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻

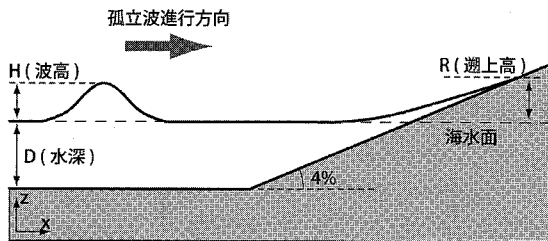


図-1 孤立波の数値実験に用いる計算モデル

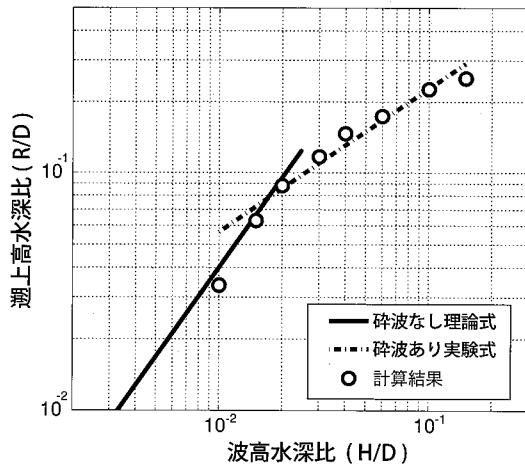


図-2 計算結果と Synolakis (1987) との比較

いて、遡上運動を表現できるよう改良を行った。

(2) 孤立波による検証

改良を行った解析手法による遡上計算の検証を行うために、以下のような孤立波を用いた数値実験を行った。

図-1 に示すような水平な床の途中から、斜面勾配 4% の遡上斜面を持つ 2 次元計算モデルを作成し、沿岸部において孤立波を発生させ、斜面に入射させることで、遡上高がどの程度得られるかを調べる。ここに、 H は波高、 D は水深、 R は遡上高を示す。波高水深比 (H/D) を変化させることで 8 パターンの数値実験を行い、得られる遡上高水深比 (R/D) を Synolakis (1987) の研究結果と比較をすることで検証を行った。

図-2 に本研究の計算と Synolakis の研究の比較を示す。図中に 2 本の直線が存在するのは、Synolakis は波高水深比が大きい碎波を伴う場合の遡上高水深比を水槽実験による実験式、波高水深比の小さい碎波を伴わない場合の遡上高水深比を理論式によりそれぞれ求めているからである。碎波の有無を問わず、本手法で得られた計算結果は概ね Synolakis の結果と良く一致していると言える。

ところで、碎波の有無にかかわらず、両者が一致を示していることから、本研究で行った計算において、碎波現象がどのような形で現れているかを見定める必要があ

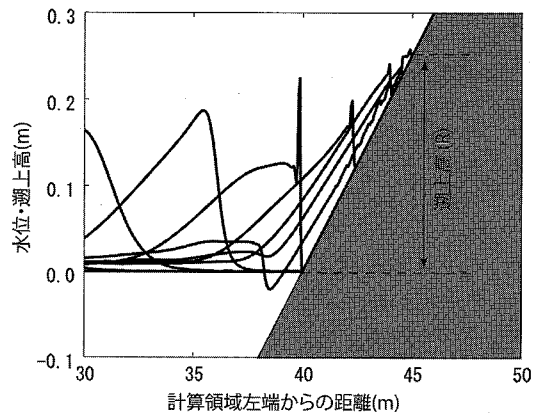


図-3 遡上先端付近の波の軌跡

る。そこで、図-3 に $H/D=0.15$ の碎波を伴う場合の孤立波遡上の先端付近の形状図を示す。35 m 付近での波に見られるように、孤立波が斜面に近づくにつれて浅水変形を起こし、前のめりの形になっている。しかし、次の状態での波は波高が若干減少し、波前面に切り立った鋭い波が新たに発生している。この切り立った鋭い波は、本研究で用いている高さ関数法が 1 価の関数であり、複雑な水面形状を表現できないため、本来碎波を起こす要因となる後方からの相対的に速度の早い部分がこれ以上波から前方へ飛び出ることができず、波前面で蓄積されたためと推測される。結果的に遡上高も一致することから、本研究で用いた手法における、碎波現象はこういったところに現れるものと考えられる。

なお計算条件として、波高とメッシュサイズの比が 1 より大きいケース ($H/\Delta z < 1$) で計算を行ったところ、遡上しない、あるいは正しい遡上高が得られないなどの結果が得られたことから、本研究の手法で正しい遡上高を得るためには少なくとも $H/\Delta z > 1$ である必要がある。すなわち、遡上計算を行う場合はメッシュサイズを適切に設定することも重要であることが確認された。

4. 計算領域のネスティング機能の追加

(1) ネスティングの概要

津波被害を引き起こすような震源断層は数 10 km ～ 数 100 km に及び、近地津波であっても、計算領域をかなり広域に設定する必要がある。さらに、先述のように、遡上計算を行う場合はメッシュサイズを波高よりも小さく設定する必要があることや、防災上重要な沿岸部においては数 m 以下のオーダーで詳細に解析する必要がある。これらを踏まえた上で全領域を NS 方程式を用いて 3 次元的に一樣な高解像度で計算することは現段階において非常に難しい。しかし、大水深の沖合いでは沿岸ほどメッシュを細分化する必要性はなく、水平方向には数

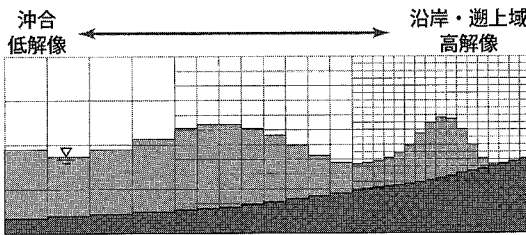


図-4 ネスティングのイメージ図

(a) 平面図

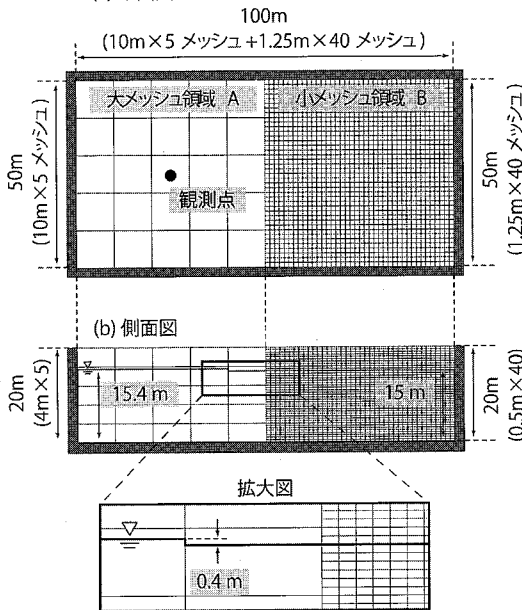


図-5 ネスティングのテスト計算モデル

100 m ～数 km 程度の解像度でも十分と考えられる。そこで、本研究では図-4 に示すように、メッシュサイズを沖合いから段階的に細分化（以下、ネスティングと呼ぶ）するように改良を行った。

本手法ではスタッガード格子を用いているため、メッシュサイズが変化する場所では格子サイズの違いから、流速や圧力の定義点が異なり、そのままでは差分計算を行うことができない。そこで、差分計算を行うために、差分に必要な位置での流速や圧力を周りの格子の定義点から線形補間を用いて決定する手法を開発した。この手法を用いて2つの領域間で物理量の受け渡しができるようにコードを改良した。

なお、本研究では時間方向の細分化は行っておらず、一番メッシュが小さい領域での CFL 条件（例えば、河村ら、1995）を満たす Δt を用いて計算を行っている。

(2) テスト計算

ネスティング手法の妥当性を確認するため、図-5 に

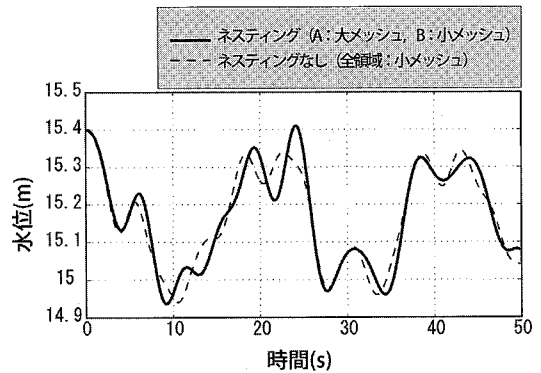


図-6 テスト計算の水位時刻歴波形の比較

示す簡単なモデルを用いて計算を行った。尚、この計算はメッシュサイズの比率を 8 : 1 で計算を行っているが、2 : 1, 4 : 1 についても同様の計算が可能であることを確認している。

図-5 に示すように、計算領域を A と B の領域に分割し、領域 A においてはメッシュサイズを $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 4\text{ m}$ ($5 \times 5 \times 5$ 分割)、領域 B においては $1.25\text{ m} \times 1.25\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ ($40 \times 40 \times 40$ 分割) とした。また、計算結果を比較検証するために、図-5 と同様な計算領域で、全領域を B の小メッシュを用いる計算も行った。なお、図-5 の下図のように領域 A の水位を静的に 0.4 m 上昇させて解放し波を発生させた。同図 (a) 中の観測点の位置での水位時刻歴を図-6 に示す。

図-6 より、両計算結果は完全な一致を示しているわけではないが、全体的にほぼ同じような動きをしている。津波計算の精度を考えた場合、十分な精度であると考えられる。

ここで示したネスティングを行うことによって、メッシュ数を大幅に減らし、PC のメモリの負担を軽減できる可能性がある。また、テスト計算の両モデルによる計算時間も、ほぼメッシュ数に比例する程度での短縮が確認された。

さらに、ネスティングを行うことにより、メッシュサイズの異なる領域を接合したモデルでも 3 章で述べた孤立波遡上の数値実験を行い、先ほどの図-2 の計算結果とほぼ同じ、Synolakis (1987) の理論・経験式と良く一致する結果が得られることを確認した。

5. 近地津波の発生・伝播・遡上シミュレーション

前述した方法を既往の動的津波解析手法に適用することで、近地津波の発生・伝播・遡上シミュレーションを行った。計算モデルは図-7 に示すように全体として約 100 km 四方程度の領域であり、メッシュサイズが異なる領域を 5 つ組み合わせている。メッシュサイズ 1024

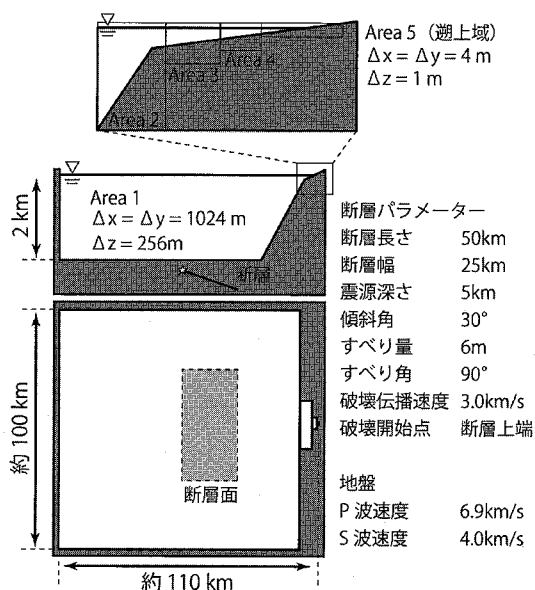


図-7 計算モデルと断層パラメーター

m $\times$ 1024 m $\times$ 256 m (Area 1) から4分の1づつ細分のネスティングを行い、遡上域では4 m $\times$ 4 m $\times$ 1 m (Area 5) としている。本計算においては、Area 1～5の計算領域を段階的に縮小しており、Area 5では700 m $\times$ 400 m 程度の計算領域である。なお、Area 5のみに遡上計算が可能なるよう改良した自由表面境界条件を適用している。また、陸上部に構造物模型を配置して、3次元的な津波氾濫計算が可能であることの実証を試みた。これら5つの領域を $\Delta t=0.1 \text{ s}$ として1つのモデルで海底地震の発生から津波遡上までの一連の解析を行った。

地盤領域の解析に用いた断層モデルのパラメーターを図-7に示す。本研究では津波の発生を解析するために、すべり量を大きめに設定して行っている。地盤領域の解析結果を流体領域の境界条件として用いる際、既往の動的津波解析手法では地震動の速度のみを境界条件として入力していた（例えば、Ohmachi・Tsukiyama・Matsumoto, 2001）。しかし、近地津波では震源近傍の地形そのものが隆起・沈降によって変化するため、地盤震動の計算結果の海底面速度だけでなく変位も合わせて入力を行った。

最大領域であるArea 1での解析結果のうち5(s), 20(s), 80(s), 200(s)でのスナップショットを図-8示す。なお、津波を強調するために、鉛直方向の変動の倍率を上げて図示している。右側壁面の隙間が開いている部分は、Area 2と接合している箇所である。断層運動とともに地殻変動による隆起によって、海面が上昇し、津波が発生している様子がよくわかる。発生した津波が主として断層直交方向に大きく伝わっている様子も見て取れ

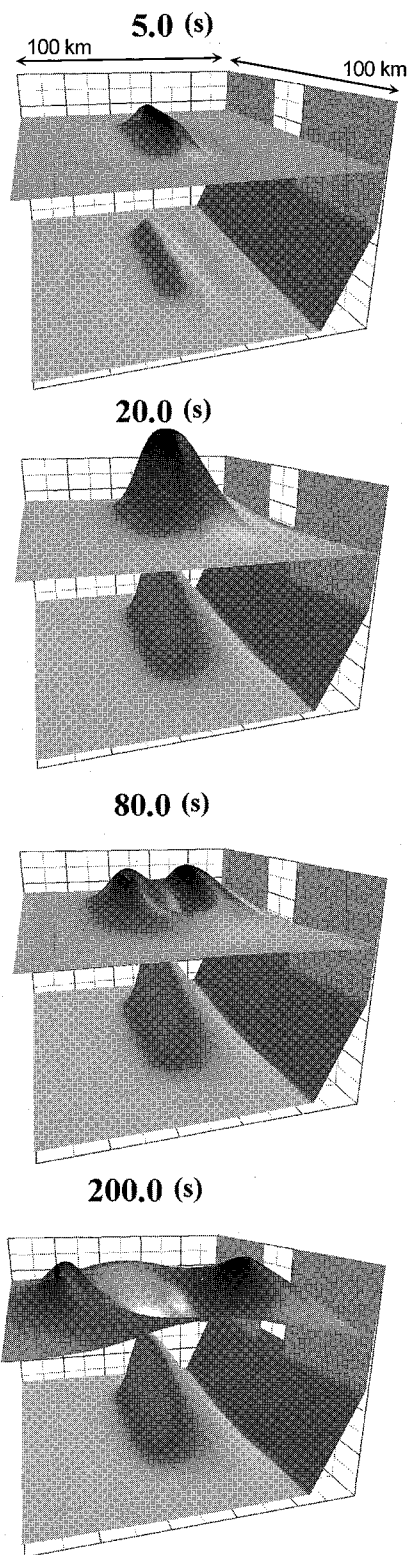


図-8 Areal の解析結果

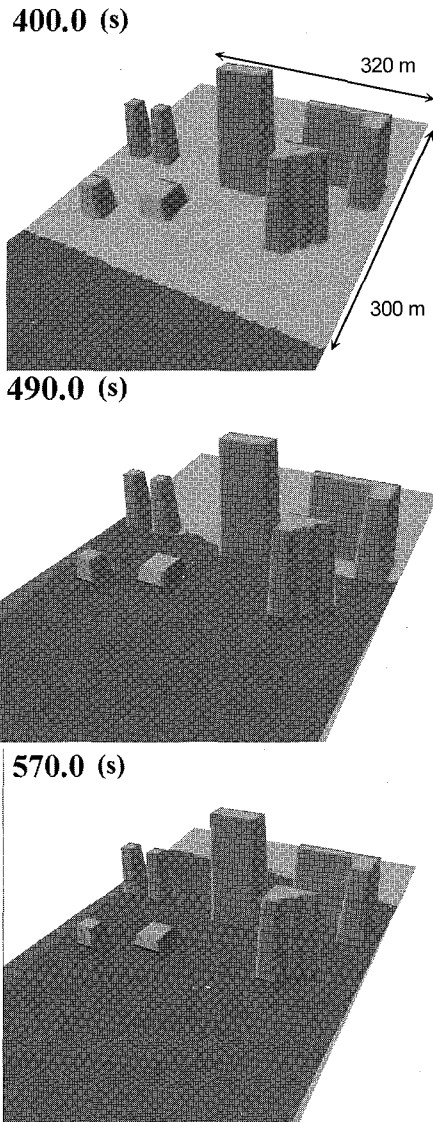


図-9 遡上域 (Area5) での解析結果

る。

次に、遡上域である Area 5 での解析結果を図-9 に示す。Area 1 から Area 5 まで津波が伝播し遡上する様子が3つのスナップショットに示されている。また構造物模型が配置されていても、遡上計算が適切に行われている様子が確認できる。

以上の結果から、近地津波の発生・伝播・遡上過程の

一連の挙動がシミュレーションされていることが確認できた。一方、現状では最大遡上後の計算が適切に行えないことから、津波第一波以降も解析できるようにさらに改良する必要がある等の課題も残った。

6. おわりに

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- 既往の動的津波解析手法に遡上解析の機能を付加するとともに、遡上域に構造物を配置することで沿岸地域での3次元津波氾濫解析が可能となった。
- 解析対象領域のモデル化にネスティングを適用することで計算効率が高まり、同手法の実用性が大幅に向上した。
- これらの機能追加により、動的津波解析手法で近地津波の発生・伝播・遡上の一連の過程を1回の計算実行で3次元的にシミュレーションすることが、ほぼ実用段階に達した。

本研究は、計算手法の開発、拡張に主眼をおいて行ったため、津波現象そのものの詳細な考察を行っていないが、今後は3次元的な圧力分布や流速分布についても妥当性を検証し、それらが構造物に与える影響なども調べていく必要がある。また、同手法を現実の問題に適用し、実用性を検証する必要がある。

参 考 文 献

- 大町達夫・仲摩貴史(1997):断層運動に伴う動的地盤変位を考慮した津波解析の評価, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 311-314.
- Ohmachi, T., H. Tsukiyama, H. Matsumoto(2001):Simulation of Tsunami Induced by Dynamic Displacement of Seabed due to Seismic Faulting, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 91, No. 6, pp. 1898-1909.
- 河村哲也・川原睦人・平野廣和・登坂宣好・池川昌弘(1995):非圧縮性流体解析, 東京大学出版会
- Hirt, C.W., B. D. Nichols, N. C. Romero (1975):SOLA, A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows, Los Alamos Scientific Laboratory Report, LA-5852.
- Laitone, E. V.(1960):The second approximation to cnoidal and solitary waves, J. Fluid Mech., Vol. 9, pp. 430-444.
- Nichols, B. D., C. W. Hirt, R. S. Hotchkiss(1980):SOLA-VOF:A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries, Los Alamos Scientific Laboratory Report, LA-8355.
- Synolakis, C. E.(1987):Runup of solitary wave, J. Fluid Mech., Vol. 185, pp. 523-545