

津波防災における数値計算の利用

Application of Numerical Simulation to Tsunami Disaster Prevention

高橋 智幸
秋田大学工学資源学部

Tomoyuki Takahashi
Faculty of Engineering and Resource, Akita University

E-mail: tomoc@ce.akita-u.ac.jp

1 はじめに

津波防災においては、防波堤や水門等のハードウェアによる津波対策も行われているが、これらの施設だけでは防ぎきれない津波が発生する危険性は絶えず存在している。したがって、実際に被害を受ける住民が自ら避難等の減災行動をとることが重要であり、そのためにはどのような津波が来襲するのかを知っておく必要がある。このような防災情報を住民と行政の防災担当者に提供するためには数値計算が不可欠である。

津波防災における数値計算の利用方法は大きく 2 つに分けることができ、1 つは地震発生直後に津波の来襲状況を予測する津波予報であり、もう 1 つは将来発生する危険性のある津波災害を予測する被害想定である。これらは省庁や自治体によって実施される防災事業であり、代表的な例として気象庁の量的津波予報と中央防災会議の南海トラフでの被害想定について 2 章で紹介する。

上記の防災事業において実用的に用いられている津波の数値計算法は、研究分野において試験的に用いられている支配方程式や計算スキーム等と比較すると精度的に低い部分もある。しかし、既に多くの防災事業での実績を有しており、複雑な実地形においても安定した解が求まっているものであるから、本稿でもこの実的に用いられている数値計算法を 3 章で紹介する。ただし、これらの数値計算法は研究レベルで用いられているものに比べると比較的簡単であり、既に幾つかの解説（例えば[1], [2]）も存在する。したがって、本稿では、数値計算法自体の紹介は最低限にとどめ、実際の数値計算時に必要となる周辺技術、例えば地形条件や外力条件などの設定を中心に説明を行う。

2 津波防災で利用されている数値計算の現状

2.1 気象庁の量的津波予報

気象庁は、従来からマグニチュードや震源位置等を基にした経験的な津波予報を行ってきたが、1999 年 4 月 1 日より津波の数値計算法を利用した量的津波予報[3]を開始した。これに伴い予報区域も、従来は全国の海岸を 18 区域に分けていたものを都道府県単位（一部はさらに分割）に相当する 66 区域に細分化している。予報区の一部を図 1 に示す。また、予想さ

れる津波の高さも具体的な数値で発表されるようになった。

量的津波予報は数値計算結果を基に発表されているが、これはリアルタイムの計算ではなく、データベース方式が採用されている。すなわち、地震発生後に津波の数値計算を実施するのではなく、予め数値計算結果をデータベース化しておき、発生した地震に最も近いケースをデータベースから抽出している。具体的には、日本周辺の海域に図 2 に示す約 4000 点の震源を想定して、その海域で発生する標準的な断層モデルを設定している。さらにそれぞれの断層モデルにおいてマグニチュードと震源の深さを変化させたモデルも設定しているため、約 10 万通りの津波を想定している。そして、これらを初期条件として津波の伝播計算を実施して、沿岸に来襲する津波の高さと予想到達時間をデータベース化している。



Fig. 1 Tsunami forecast areas

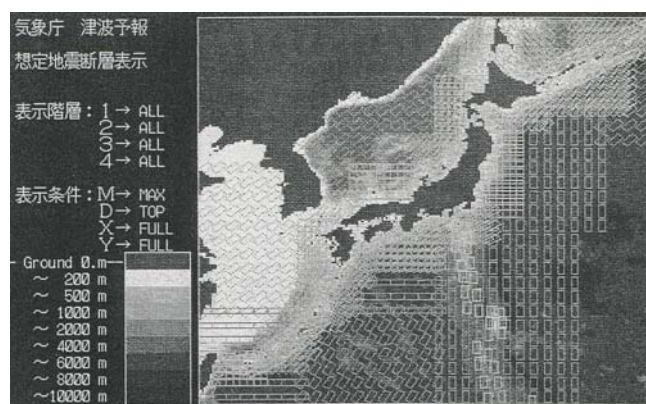


Fig. 2 Database of tsunami numerical simulation

2.2 中央防災会議による被害想定

中央防災会議は防災基本計画等の作成およびその実施の推進を図る組織であり、我が国の防災の方向性を示す立場にある。同会議では甚大な被害の発生が予想される災害について専門調査会を設置して、被害想定や防災計画を検討している。本稿では、「東南海・南海地震等に関する専門調査会」が実施した南海トラフにおける地震津波の被害想定の結果を紹介する。

南海トラフにおいては、東海地震、東南海地震、南海地震の発生が懸念されている。同専門調査会では、これらの地震が単独あるいは同時に発生するケースをそれぞれ想定して、津波の数値計算を実施している[4]。被害想定の一例として、3つの地震が同時に発生した場合に沿岸に来襲する津波の高さの分布を図 3 に、1m の津波が到達するまでの時間の分布を図 4 に示す。満潮時に津波が発生した場合は伊豆半島から四国に至る太平洋沿岸の広い範囲に 5m 以上の津波が来襲することが分かる。また、1m の高さの津波が到達する時間も太平洋沿岸の多くの場所で 20 分以下となっており、津波危険度の高いことが示されている。

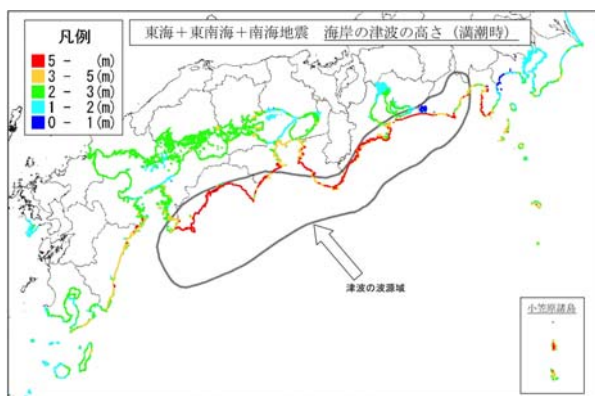


Fig.3 Distribution of tsunami heights[4]



Fig.4 Distribution of arrival time[4]

3 津波防災で用いられている数値計算法

3.1 支配方程式

津波は、高潮や洪水流などと同様に長波理論 (long wave theory)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M}{D^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2 N}{D^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \tag{3}$$

にしたがう。ここに、 η は水位、 D は全水深、 g は重力加速度、 n は Manning の粗度係数、 M と N は x 方向および y 方向の流量フラックスである。

長波理論は質量保存則から導かれる連続の式(1)と運動量保存から導かれる運動方程式(2)および(3)で構成されており、いずれも鉛直方向に海底から水面まで積分して求められるため積分モデル (integrated model) といわれる場合もある。

連続の式は長波理論特有の仮定および近似を用いることなく導出されているため、他の理論における連続の式と共通である。運動方程式はナビエ・ストークスの運動方程式から求められるが、粘性による応力テンソルに起因した水平拡散項および水面でのせん断応力項は、津波を対象とした場合は他の項に比べて小さいため省略されることが多い。また、水深 50m 以深では非線形項 (式(2), 式(3)の第 2 項および第 3 項) や海底摩擦項 (式(2), 式(3)の第 5 項) の影響が小さくなるため、これらの項を省略して線形化を行なうことができる[5]。線形化した長波理論を線形長波理論 (linear long wave theory) といい、線形化を行っていない通常の長波理論を浅水理論 (shallow water theory) あるいは浅水長波理論 (shallow water long wave theory) という。水深 50m 以浅や遡上域の計算では浅水理論が用いられる。

なお、波面の曲率や波の分散性が無視できない場合には分散項を追加する必要がある[5]、また外洋を伝播する遠地津波などのように計算領域が広域になる場合にはコリオリ力を考慮

しなくてはならない。

3.2 計算スキーム

津波の数値計算においては構造格子を用いた差分法が一般的に使用されている。構造格子は直交座標格子と境界適合格子に分けられるが、津波の数値計算においては、市街地の河川形状を詳細に再現する場合などを除き、直交座標格子が一般的に用いられている。

変数の配置法としては staggered 格子が用いられており、水位および水深、全水深を格子中央、流量フラックスを格子境界上にとっている。ただし、流量フラックスとの組で微分される水位および水深、全水深については、格子中央に配置されている水位または水深、全水深から格子境界上の値を線形補間して用いられる。

差分スキームとしては、leap-frog 法が一般的に用いられている。慣性項と圧力項(式(2)、式(3)の第1項および第4項)の関係を例として leap-frog 法のスキームを図5に示す。図中、 n は離散化された時間軸である。時間方向にも中央差分が用いられており、時間的および空間的に2次精度の中心差分法であることが分かる。leap-frog 法は、ノイマンの安定解析では中立安定となるため散逸誤差が発生しない。

しかし、leap-frog 法の欠点として、分散誤差がよく指摘されている。これは、クーラン数が小さくなると、カットオフ波数付近で高周波成分に遅延が見られるようになり、遅延位相誤差が発生するためである。津波を対象とした場合はカットオフ波数付近でのエネルギースペクトルは比較的小さいと考えられるが、計算された波形に格子間隔に対応した高周波成分が発生していないかを確認する必要がある。

移流項については一次精度の風上差分[1]や Lax-Wendroff 法[6]が提案されているが、既往の津波解析においては前者がより多く用いられている。しかし、テイラー展開を行うと一次精度の風上差分からは格子間隔に対して一次の打ち切り誤差が求められる。これは格子間隔に比例して大きくなる数値粘性を意味しており、解を平滑化し、津波の波形をなまらせてしまう効果がある。そのため、数値粘性が比較的小さい高次精度の風上差分も提案されているが、高次の差分スキームほど数値振動が発生しやすく、不安定を招く危険性が高い。現在のところ、高次精度の風上差分を適用した津波の数値計算については十分な検討が行なわれておらず、実用段階には至っていない。したがって、実用上は一次精度の風上差分の安定性を優先し、それに伴う数値粘性を最小限に抑えるため格子間隔を十分に小さくする方法で対応している。これは前述のカットオフ波数を大きくする点においても有効である。

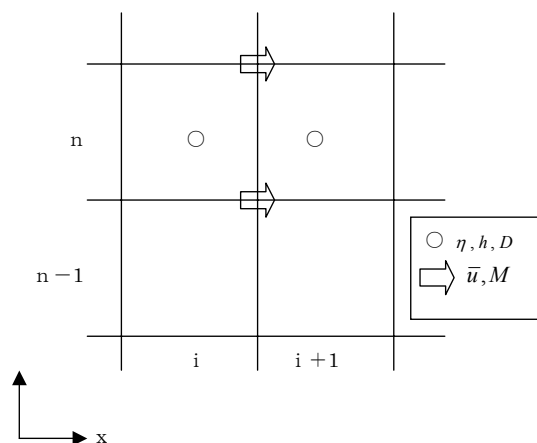


Fig.5 Leap-frog scheme

3.3 地形条件

津波の数値計算を行なう上で地形条件は必須である。しかも、その精度は最終的な計算結

果に大きな影響を与える。場合によっては、外力条件よりも重要となる。そして、数値計算にかかる労力の大部分がこの地形条件の作成に充てられることも多い。

数値計算用に加工された地形条件として、海域のものを水深データ (depth data) あるいは海底地形データ (bathymetry data)、陸域のものを地形データ (topography data) という場合がある。以下に一般的に入手が可能な地形条件を紹介する。

水深データは外洋と沿岸部とで分けて考えることができる。外洋では津波の発生を計算するため、南海トラフ等のプレート境界を含んでおり、かつ断層面が余裕を持って設定できるように広域の地形条件が要求される。ただし、水深が大きいため津波の伝播速度も大きくなることから、比較的大きな格子間隔で十分となる。一方、沿岸部では津波の来襲を計算するため、局所的な地形も再現されていることが必要となる。さらに、伝播速度も小さくなることから、格子間隔も小さいものが要求される。

一般的に、外洋での水深データは、公的機関や研究者によって既に作成されているものを利用することが可能である。海外で作成されたデータとしては、米国地球物理学データセンター (National Geophysical Data Center, NGDC) [7] が販売している ETOPO2 や David T. Sandwell ら [8] が提供している海底地形データ [9] などがある。ただし、これらの二つのデータは重複しており、完全に独立なものではない。また、国内で作成されたデータとしては、日本海洋データセンター (JODC) [10] が提供している J-EGG500 や国土交通省の国土数値情報 [11] などがある。

一方、沿岸部での水深データとしては、一般に提供されているものはほとんどない。したがって、海図などから手作業でデジタル化を行なう必要がある。市町村スケールでの数値計算を行なう場合には、海上保安庁海洋情報部 [12] が刊行している航海用海図や海の基本図がよく用いられている。また、市町村スケールよりさらに詳細に、例えば港湾スケールでの数値計算を行なおうとすると、一般に市販されている海図では対応できない場合が多く、各港湾の工事用図面などが必要となる。それらの多くは販売目的では作成されていないため、自治体などに直接問い合わせなくてはならない。

津波の被害想定では市街地での氾濫計算も行なうことが望ましいが、その場合は陸域の地形データも必要となる。地形データは、水深データに比べて利用目的が多いため、整備状況は進んでいる。しかし、津波の数値計算に用いることを考えた場合には、十分な情報を有しているものは少ない。例えば、国土地理院 [13] が数値地図を提供しているが、標高の単位が 1m で入力されているため、津波の数値計算にそのまま用いるには適していない。汀線データや水準点などを加えて補間する必要がある。

近年、GIS (地理情報システム) の普及が著しく、それに対応してデジタルデータの種類や量も格段に増えている。また、新たなデータの作成も容易になってきており、最近では幾つかの測量会社がレーザープロファイラにより詳細な地形データを作成しており、既に作成済みの都市では安価に入手可能な場合もある。

予算的な制限がある場合は、デジタイザや CAD ソフトを用いて手作業でデジタル化を行なう必要がある。地図としては、国土地理院刊行の地形図を用いることができるが、市街地などをデジタル化する場合は自治体が提供している各種の図面も参考にすることが望ましい。

デジタル化された水深あるいは標高は不規則な配置になっているため、これらを補間して構造格子を作成しなくてはならない。一般的には、GMT[14][15]の `nearneighbor` コマンドや `surface` コマンド、GIS ソフトが提供している各種の補間機能を使用する機会が多い。ただし、地形条件の補間は二次元である上、海岸線などの複雑な形状を有するため、機械的に補間を行なった後は基になっている地図と比較して不自然な地形が再現されている場所がないかを確認する必要がある。特に、海域と陸域の境界である汀線の形状は補間が難しいため注意を要する。一例として、2003 年十勝沖地震津波の数値計算を行うために GMT の `nearneighbor` コマンドを用いて J-EGG500 から作成した地形条件[16]を図 6 に示す。なお、図中の★印は震源を表している。

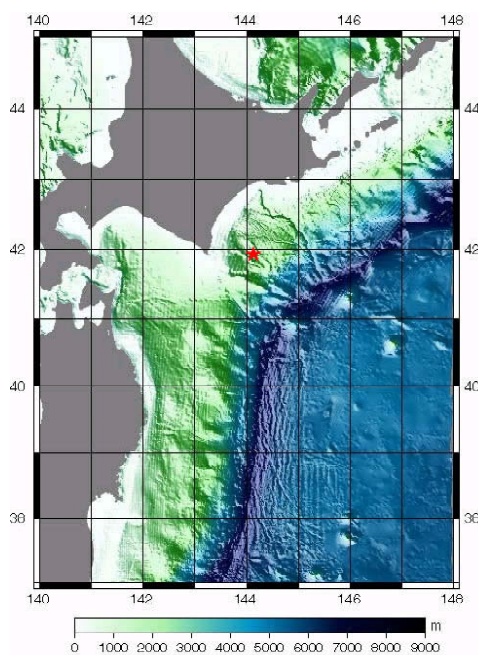


Fig.6 Bathymetry data

3.4 外力条件

津波の数値計算における外力条件としては、初期条件と境界条件で与える方法がある。前者は計算領域内で津波を発生させる方法で、後者は計算領域外で発生した津波の水位や流量フラックスの時間的変化を計算領域の境界で入力する方法である。一般的には前者を使用するが、計算領域の構成が複雑であったり、湾口や外海で観測された津波の波形を用いたい場合は後者を使用する。

なお、津波を発生させる原因としては、海底地滑りや海底火山噴火、隕石衝突など多くの地球物理学的現象が考えられる。しかし、津波の約 9 割は地震によって発生しているため、本稿では地震、すなわち地震津波を取り上げる。

地震の発生メカニズムは断層モデルで表現することができる。断層モデルは動的断層パラメータと静的断層パラメータから構成されているが、津波の初期条件として必要となるのは図 7 に示した静的断層パラメータである。一例として、2003 年十勝沖地震について Harvard 大学と東京大学が提案している断層モデルを表 1 に示す[16]。

既往津波の数値計算を行うためにはそれらの断層パラメータが必要となるが、多くの地震や津波のデータをまとめた文献としては[17],[18],[19]などがある。これら以外にも多くの研究がなされているが、それらの研究結果はそ

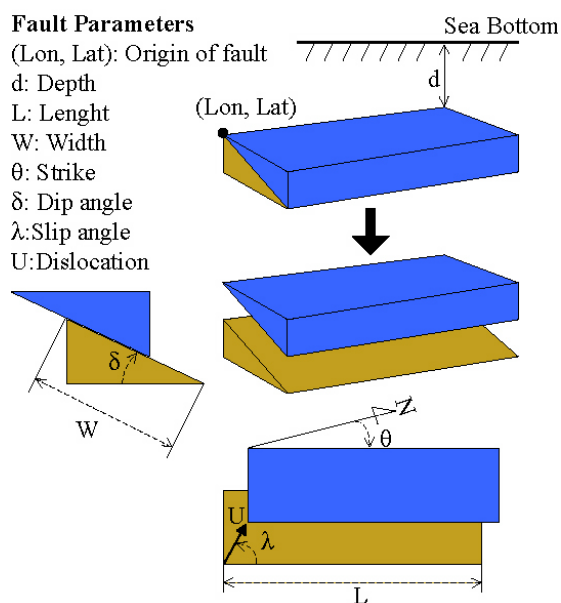


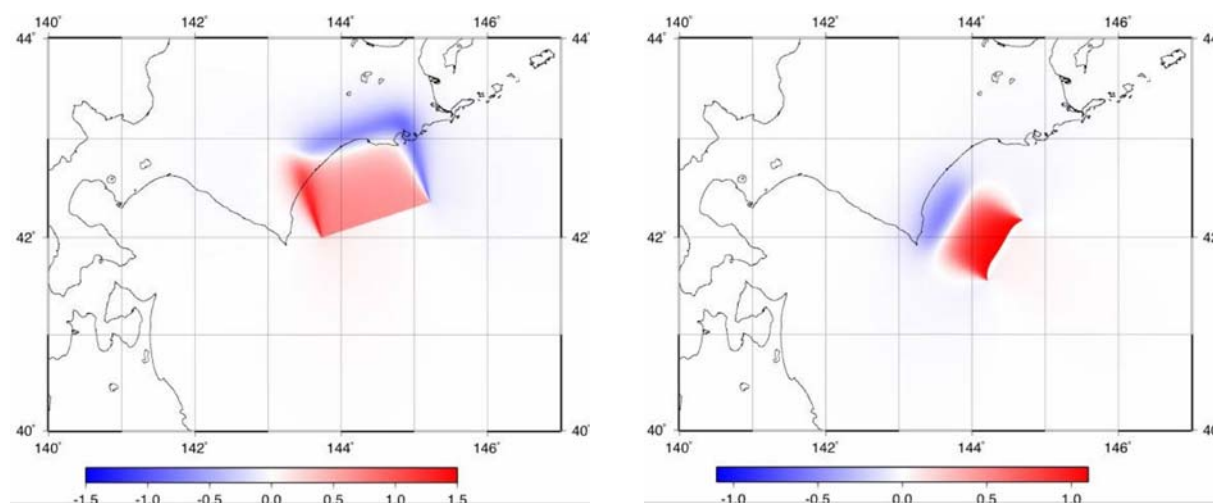
Fig.7 Fault parameters

れぞれ論文として発表されているため各論文集を調べなくてはならない。これらの文献検索には各種の災害関連のデータベースが有効であり、津波に関しては土木図書館[20]や自然災害データベース SAIGAI[21]、地震学会ライブラリー[22]などが利用できる。

このような断層モデルに対して Mansinha and Smylie の方法[23]や Okada の方法[24]を適用すると、海底の隆起や沈降の分布が求められる。そして、その上部に乗っている海水の流出入は地震による海底変動にくらべて十分に緩慢であり、海水の圧縮量も十分に小さいと仮定すると海面変動は海底変動に一致すると考えられる。これが津波の初期波形 (initial tsunami profile, tsunami source) といわれるもので、津波の数値計算における外力条件となる。一例として、表 1 の断層パラメータから計算された十勝沖地震津波の初期波形[16]を図 8 に示す。赤い領域が海面の上昇、青い領域が下降を表しており、いずれも陸側に下降、沖側に上昇が位置している。

Table 1 Fault models on the 2003 Tokachi-Oki Earthquake

Model	Length (km)	Width (km)	Depth (km)	Strike (deg)	Dip (deg)	Slip (deg)	Dislocation (m)
Harvard Univ.	130	100	0	252	11	136	4.6
Univ. of Tokyo	80	80	0	210	17	91	3.6



(a) Harvard Univ. model

(b) Univ. of Tokyo model

Fig.8 Initial tsunami profile on the 2003 Tokachi-Oki Earthquake

3.5 計算結果の後処理 (可視化)

以上の技術を用いることにより津波の数値計算が可能となるが、ここでは 2003 年十勝沖地震津波[16]を例として、計算結果の後処理を示す。

図 6 に示した地形条件において、図 8 に示した津波の初期波形を発生させる。海面変動、すなわち位置エネルギーの分布が初期条件となり、重力を復元力とした津波の伝播が計算される。数値計算においては水位および流量フラックスの時間的空間的变化が求められている

が、記憶容量の制限から全データを保存するのではなく、解析に必要なデータのみを出力することになる。津波の解析においては、一般的に以下のような可視化を行う。

(1) 汀線付近のある地点における水位および流量フラックスの時間的变化 (図 9)

(2) 汀線に沿った最大水位の一次元分布 (図 10)

(3) 津波伝播のアニメーション (動画 1 ([./fig11a.wmv](#)), 動画 2 ([./fig11b.wmv](#)))

(1) は検潮記録やナウファス [25], GPS 津波計 [26] 等の観測記録, (2) は現地調査から求められる遡上高の分布等との比較に用いられる。また, (3) はエッジ波等の面的な津波の挙動を調べるために用いられる。

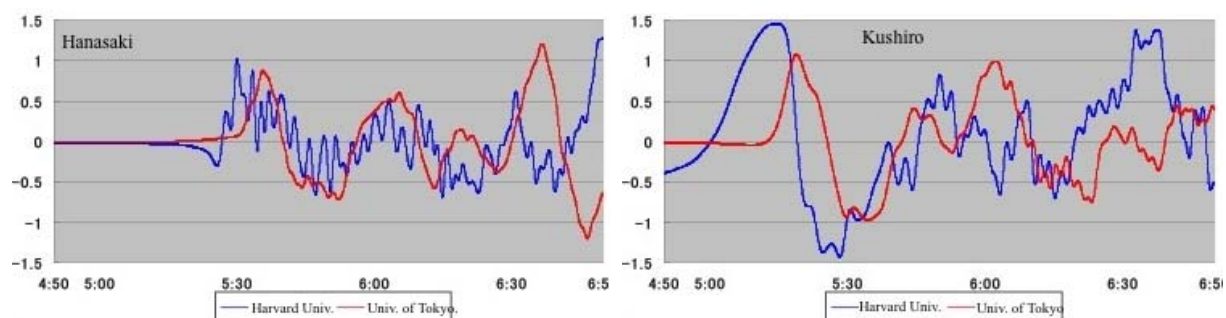


Fig.9 Computed waveforms in Hanasaki and Kushiro

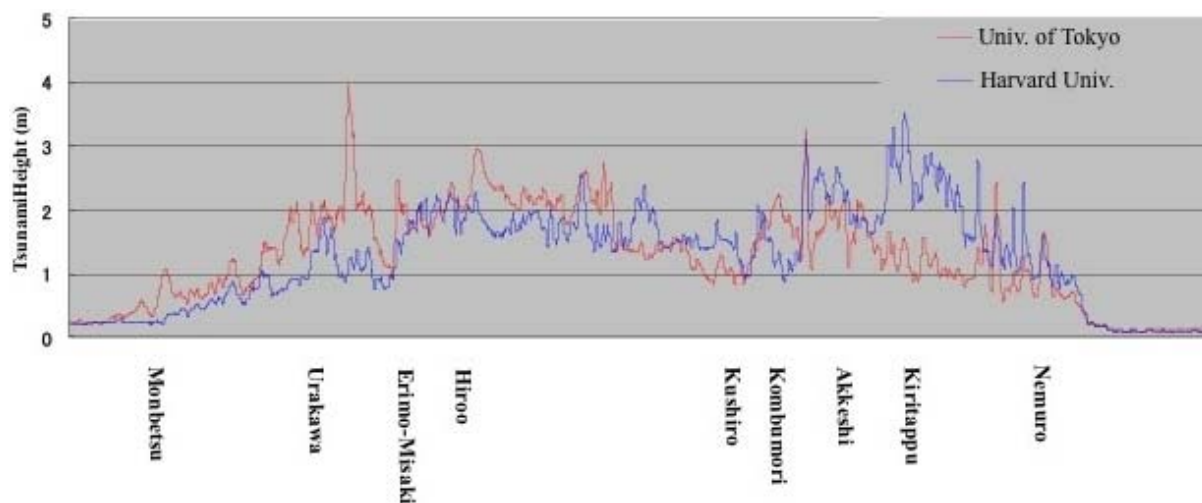


Fig.10 Tsunami height distributions along the Hokkaido coast

4 おわりに

津波防災における数値計算の利用の現状と実際の防災事業で使用されている数値計算法を紹介した。津波に限らないが、防災において最も重要なことは、住民や行政の防災担当者が当事者意識を持ち、自ら能動的に減災努力を行うことである。しかし、どのような災害が発生するのかを知らなくては行動を起こすことはできない。すなわち、住民や防災担当者に具体的で分かりやすい防災情報を提供することが不可欠であり、そのためには津波の数値計算は有効な手法となっている。

このような津波防災における数値計算の利用をより推進するためには、研究分野で用いられているより高精度の数値計算法を実務にも適用して行くことが重要である。また、計算結果を実際の防災により効果的に活用するためのユーザーインターフェースの開発も必要である。

参考文献

- [1] 後藤智明・小川由信, “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, (1982), 52
- [2] 高橋智幸, “津波の解析技術- 南海地震津波を例として-”, 土木学会水工学シリーズ, (2002), 02-B-5
- [3] 舘畑秀衛, “津波数値計算技術の津波予報への応用”, 月刊海洋, 号外 No. 15, (1998), 23-30
- [4] 中央防災会議「東南海, 南海地震等に関する専門調査会」, “東南海, 南海地震の強振動と津波の高さ (案)”, (2003), 81
- [5] 首藤伸夫, “津波の計算における非線形項と分散項の重要性”, 第 23 回海岸工学講演会論文集, (1976), 432-436
- [6] 田中寛好, “沿岸部における津波予測モデルの開発”, 電力中央研究所報告, U385017, (1985), 46.
- [7] National Geophysical Data Center の web site (<http://www.ngdc.noaa.gov/>)
- [8] Smith, W. H. F. and Sandwell, D. T., “Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings”, Science, Vol.277, (1997), 1957-1962
- [9] カリフォルニア大学サンディエゴ校が提供している海底地形データの web site (http://topex.ucsd.edu/marine_topo/)
- [10] 日本海洋データセンターの web site (<http://www.jodc.go.jp/>)
- [11] 国土数値情報の web site (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>)
- [12] 海上保安庁海洋情報部の web site (<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/>)
- [13] 国土地理院の web site (<http://www.gsi.go.jp/>)
- [14] Wessel, P. and W. H. F. Smith, “Free software helps map and display data”, EOS Trans. AGU, 72, (1991), 441
- [15] ハワイ大学の GMT の web site (<http://gmt.soest.hawaii.edu/>)
- [16] 永田祐一郎・高橋智幸・松富英夫・今井健太郎・鈴鹿陽, “2003 年十勝沖地震津波の波源域の推定”, 海岸工学論文集, 第 51 巻, (2004), 266-270
- [17] 宇佐美龍夫, “日本被害地震総覧”, 東京大学出版会, 第 5 版, (1999), 352
- [18] 渡辺偉夫, “日本被害津波総覧”, 東京大学出版会, 初版, (1985), 206
- [19] 佐藤良輔, “日本の地震断層パラメーター・ハンドブック”, 鹿島出版会, 初版, (1989), 390
- [20] 土木図書館の web site (<http://www.jsce.or.jp/library/>)
- [21] 自然災害データベース SAIGAI の web site

(<http://maple.dpri.kyoto-u.ac.jp/saigai/info.html>)

[22] 地震学会ライブラリーの web site (<http://wwwsoc.nii.ac.jp/ssj/lib/lib.html>)

[23] Mansinha, L. and Smylie, D. E., “The displacement fields of inclined faults”,
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, (1971), 1433-1440

[24] Okada, Y. , “ Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space”,
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.75, No.4, (1985), 1135-1154

[25] ナウファスの web site (<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>)

[26] GPS 津波計の web site (<http://www.tsunamigps.com/>)