

津波の伝播・氾濫特性に基づくハザードマップに関する研究

河田 恵昭*・小池 信昭**

1. 緒 言

津波災害は、わが国の津波常襲地域でも 30~50 年に一度という低頻度であり、過去の被災経験を活かして被害を減らすことはなかなか難しいのが現状である。なぜなら、時間が経つにつれて災害を体験して津波の危険性を認識している住民は徐々に減っていき、その教訓もまた受け継がれにくいからである。したがって、津波による被害、とくに人的被害を軽減するためには、あらかじめ来襲する津波の特徴および危険性を明らかにして、それを身近な知識として住民に普及することが重要であろう。そのためには、津波ハザードマップを作成し、それを利用することが効果的であると考えられる。

津波のハザードマップを作成するためには、数値シミュレーションによる方法が一般的である。津波情報はできるだけ詳細かつ正確なことが求められる。そこで、必要な情報を得るために、数値計算のメッシュの大きさを非常に小さく取る場合も出てくる。しかし、これまで津波の数値シミュレーション法として用いられてきた差分法では、計算メッシュを原則として等間隔に構成してきた。そこでは、メッシュの大きさを小さく取るとメッシュ数が多くなり、計算時間および計算容量が過大になって効率的とはいえない。そこで、ここでは、津波氾濫の数値シミュレーション法としてメッシュ構成に柔軟性のある有限要素法を採用することにした。有限要素法では境界条件の設定が差分法よりも容易なため、防潮堤などの障害物を計算に比較的簡単に取り込めるという利点もある。

ここでは、まず、沿岸域、河道および氾濫原よりなる系における津波の挙動を、有限要素法によって数値シミュレーションする手法について説明する。そして、このモデルを 1946 年南海地震津波によって被害を受けた和歌山県の湯浅町・広川町に適用して、その適用性を検討する。その後、津波ハザードマップ作成に必要な伝播・氾濫特性を計算する。そして、その結果に基づいて、津波ハザードマップを作成する方法を示す。

2. 津波の数値シミュレーション

2.1 津波シミュレーションモデル

基礎方程式としては、以下のような連続式と浅海波方程式を用いた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} + uR = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + vR = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$R = \frac{gn^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{4/3}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 h ：基準面より自由水面までの高さ、 ζ ：基準面より地表面までの高さ、 $H = h - \zeta$ ：水深、 u, v ：それぞれ x, y 方向の平均流速、 g ：重力加速度、 n ：マンニングの粗度係数である。

津波の波源域となる外海から氾濫域までの伝播計算は差分法を用いた。初期条件としては、地震断層モデルから Mansinha・Smylie (1971) の方法を用いて計算した海底地盤変動量の鉛直成分を、海面上の水位変動として与える。陸地境界では、津波が完全反射するものとして、境界面に垂直な流量フラックスを 0 とする。また、計算領域と接する外海との境界では、日野 (1985) の無反射境界条件を用いることにする。そして、この計算から得られる水位および流速の出力を、氾濫計算の海側の境界条件とした。

一方、氾濫域の計算には有限要素法を採用した。基礎方程式を有限要素方程式にする際には、空間方向にはガラキン法によって離散化を行い、時間方向には行列の対角項への集中化を行って陽的解法とし、2段階 Lax-Wendroff 法によって離散化を行った。初期条件としては、時刻 $t=0$ での h, u, v の値をすべての節点で与える。すなわち、津波氾濫解析の場合には、 h_0 としては海域では断層によって生じた海底変動量、河道ではその水位、陸上では地盤高を与えればよい。また、 u_0, v_0 は、海域と陸上では 0 とし、河道ではその流速を与える。また、境界条件としては、外海との境界 S_1 では、津波伝播計算に

* フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所 巨大災害研究センター

** 学生会員 工博 京都大学大学院 工学研究科

よって求めた h, u, v が与えられる。また、海と陸地との境界 S_2 では、そこを横切る流れは存在しないという条件を与える。氾濫水の先端では、相田 (1977) の先端条件を用いる。すなわち、流量 q と浸水深 H の間に、 $q=0.5H\sqrt{gH}$ の関係があるものとして計算する。さらに、氾濫水と乾いた地面の境界の判定には、移動境界条件を用いる。すなわち、各要素において、3つの節点の水深がすべて正である場合には、その要素には氾濫水が到達しているとして解析領域に含める。3つの節点のうち1つでも水深が0の場合には、その要素には氾濫水が到達していないとみなして解析領域外とする。湯浅・広港の前面の防波堤では、津波の波長に対して堤防の厚さは小さいとみなせるので、石原・井田の全幅刃形せきの公式 (水理公式集 (1985)) を用いる。防潮堤、海岸堤防および河川堤防を津波が越流する場合は、本間の台形せきの公式 (水理公式集 (1985)) を用いる。市街地の家屋群中を氾濫水が通過する場合には、その密集度に応じた適当な等価粗度係数を与えることにする。

2.2 1946年南海地震津波の再現によるモデルの適用性

1946年の南海地震津波によって、和歌山県湯浅町・広川町は死者24人を出す被害にみまわれた。この地域については、羽鳥ら (1983) によって津波の高さの痕跡値の調査が行われ、相田ら (1983) によって差分法による氾濫域の再現計算が行われている。ここでは、有限要素法モデルを現地に適用して、その結果を痕跡値および差分法による計算結果と比較することによって、モデルの適用性を検討することにする。

まず、津波伝播計算の計算領域は、広領域では図-1のように、東経131度から138度、北緯31度から34度44分までの海域を取り、空間格子の大きさを、 x 方向は経度1度を80分割した大きさ、 y 方向は緯度1度を120分割した大きさとした。狭領域では図-2のように、東経135度から135度15分、北緯33度55分から34度10分までの海域を取り、 x, y 方向ともにそれを250分割した空間格子の大きさを取った。なお、最小水深を10mとした。また、狭領域でも計算が安定であるように計算時間間隔を1secとして、計算時間は3時間まで行うことにした。

つぎに、津波氾濫計算の計算領域は図-3のように、山田川、広川および江上川の下流部と湯浅湾の一部を含む湯浅町の湯浅地区および広川町の広地区を対象とした。そして、有限要素法メッシュは図-4のように、できるかぎり地形形状を再現するように努めた。地盤高は1:2,500の地形図から読みとった。メッシュの最小間隔は5mである。ここでも、計算が安定であるように計算時間間隔を1secとし、計算時間を3時間とした。ここで使用した地震断層モデルは相田 (1981) の Model 19' である。

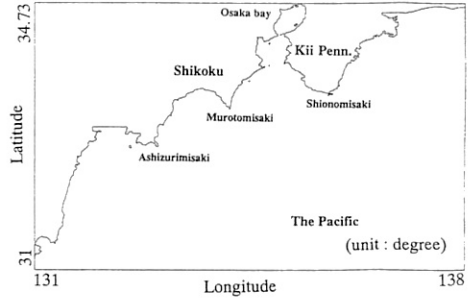


図-1 津波伝播の計算領域 (広領域)

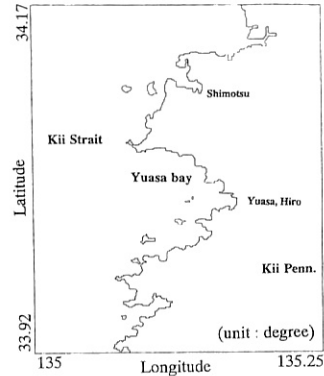


図-2 津波伝播の計算領域 (狭領域)

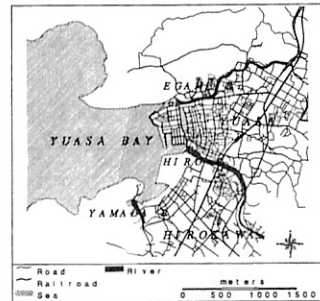


図-3 津波氾濫計算の対象地域

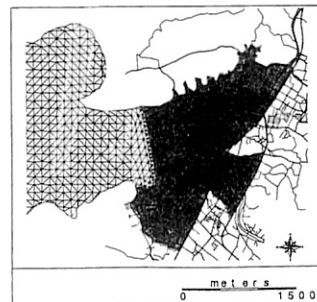


図-4 津波氾濫計算の有限要素法メッシュ



図-5 1946年南海津波の最大浸水深分布図

そして、有限要素法で用いる集中係数 e については、 $e=0$ とすると数値粘性が過大となり、 $e=1.0$ とすると計算が不安定になることが知られており、 $e=0.7\sim 0.95$ の値が用いられることが多い。ここでは、試算を行った結果 $e=0.80$ を用いることにした。また、マンニングの粗度係数 n については、海域および河道では $n=0.020$ 、陸上では $n=0.025$ を用いた。住宅密集地の等価粗度係数としては、Xanthopoulos ら (1976) によって用いられている宅地域の粗度係数 $n_e=0.067$ を用いることにした。

相田ら (1983) の計算結果は、測量値と良い一致を示しているが、江上川の支流を計算メッシュに入れて計算していないため、計算による氾濫域が測量値によるそれよりもかなり小さくなってしまっている。すなわち、差分メッシュを小さくしても、江上川支流のように河川が蛇行している場合にはさらに細くしなければ、河川の流れを再現することはできない。他方、図-5 は今回の有限要素法による津波の最大浸水深のコンター図を、羽鳥らによる測量値と比較したものである。図中、黒の点線で描いてあるのが測量値による氾濫域である。この図を見ると、江上川とその支流流域は測量値による氾濫域と非常に良好な一致を示している。つまり、有限要素メッシュではメッシュの大きさと方向を自由に取ることができるため、江上川支流のような幅が狭く、蛇行している河川でもメッシュに取り込むことが可能となり、その結果氾濫域をうまく再現できたとみなすことができる。したがって、この地域のように小河川を含む場所の津波氾濫計算をする場合には、差分法よりも有限要素法の方が適していると言うことができる。

3. 津波の伝播・氾濫特性

ここでは、津波ハザードマップ作成に必要な伝播・氾濫特性を数値シミュレーションによって求めた。

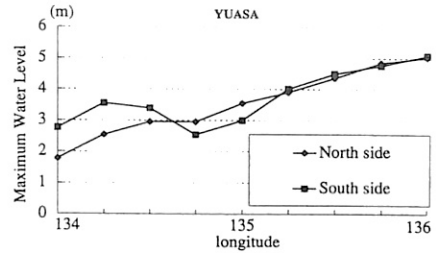


図-6 地震の震央位置による最大水位の変化

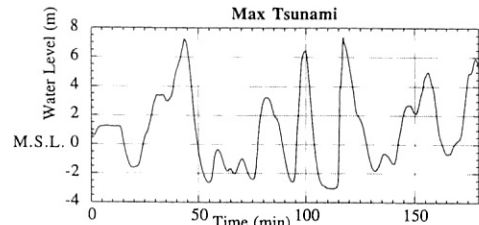


図-7 想定最大津波の水位変化

想定地震としては、大きさは1854年安政南海道地震の断層モデルである相田 (1981) の Model 20' と同じにした。そして、河田ら (1994) の研究に従って、その断層を南海トラフ沿いに動かして広領域のみの計算でもっとも水位が大きくなる場所を調べた。その結果が図-6 である。すなわち、東経136度の位置にその震央がある場合に、湯浅湾ではもっとも大きな津波に襲われる。したがって、この位置に断層モデルがあり、潮位が満潮の場合についてシミュレーションを行い、津波の伝播・氾濫特性を詳しく調べた。

まず、津波の伝播特性である最短到達時間を求めた。図-7 は、有限要素法の計算における津波の水位変化をグラフにしたものである。津波到達時間の判断は、第1波目の水位が最大となる時間とすると、この地域の津波最短到達時間は、約43分とすることができる。

つぎに、津波の氾濫特性の1つとして、最大浸水深分布を求めた。図-8 が想定最大津波による最大浸水深分布図である。この図から、現在の地理条件で大きく氾濫する可能性があるのは、江上川流域と湯浅町の埋め立て地と判断することができる。広川および山田川流域でも河川のすぐ近くは氾濫している。また、図-9 は、江上川河口の防潮水門が閉まっている場合の最大浸水深分布図である。これを図-8 と比較すると、防潮水門が閉まっているので、江上川流域の浸水深および氾濫域は小さくなっている。そして、その越流量が別の場所に振り分けられて、湯浅町の埋め立て地の氾濫域が大きくなっていると判断することができる。結局、最大浸水深が大きいのは、防潮水門が閉まっていない場合であるので、最大

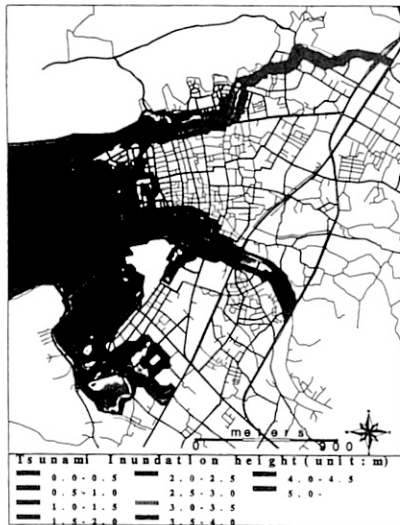
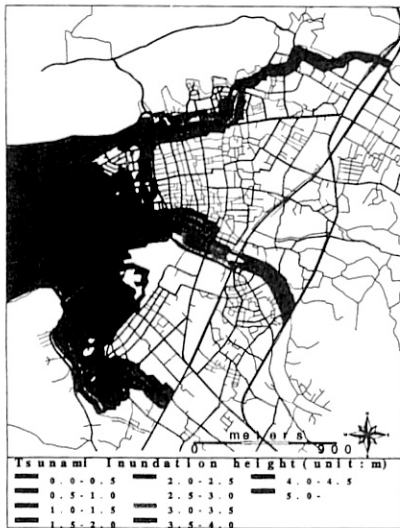


図-8 想定最大津波の最大浸水深分布図

図-9 想定最大津波の最大浸水深分布図
(防潮水門が閉じている場合)

浸水深分布図としては図-8を用いることにする。

4. 津波ハザードマップ

ここでは、すでに求めた津波の伝播・氾濫特性に基づいて、ハザードマップを作成する方法について説明する。その際には、情報を効率的に管理する手法として地理情報システム (GIS) を利用し、地理情報と計算結果というデジタル情報をうまく結びつけて、ハザードマップが効率的に作成できるように工夫した。GISソフトとしては、ベクトル型のGISであるESRI社のARC/INFOを使用した、ハザードマップ作成フローを図-10に示す。

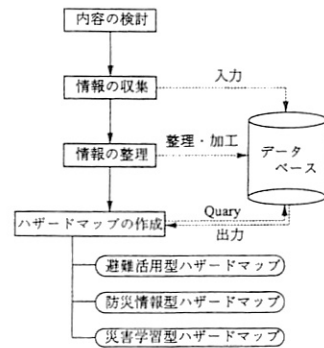


図-10 津波ハザードマップの作成フロー

以下ではこの作成フローの流れにそって、ハザードマップ作成方法を説明することにする。

1) 内容の検討：まず、ハザードマップにどのような情報が必要となるかを検討する。ここでは、避難活用型のハザードマップを作成することを考えて、地理情報のほかに、津波氾濫予想区域、避難場所、避難路、最短避難経路を記載することにした。

2) 情報の収集：地理情報は、1:2,500の都市計画図から、道路、公共施設の位置などをディジタイザを用いて入力した。その際には、道路の幅、施設の使用目的などを属性として同時に入力する。そして、すでに求めた津波の伝播・氾濫特性を以下のようにしてGISに入力した。まず、津波の最大浸水深の情報は、その x, y 座標と浸水深 H が得られているので、これをASCIIデータとして取り出す。つぎに、GISのTIN (Triangulated Irregular Network)の機能を用いて、このASCIIデータをTINデータに変換する。こうすることによって、津波の最大浸水深という情報がGIS上で処理することができるようになる。

3) 情報の整理：ここは、すでに入力した情報を整理・加工することによって実際にハザードマップに必要な情報を得る過程である。津波氾濫予想区域は前述のTINの機能を用いてコンターで表示することにする。そして、安全を考えてこのコンターのもっとも外側の線から100mのバッファを取って、この区域を除外した学校や公園などの公共施設を避難場所として選択した。避難路としては、幅が5m以上の道路を選択することにした。さらに、避難経路は避難開始地点からもっとも近い避難場所までの最短経路探索を行えばよい。その際には、GISのネットワーク機能を用いると、途中で危険箇所があってもその場所を迂回した経路を自動的に探索できる。

4) ハザードマップの作成：これまでの過程で、GISの中にあるデータベースにハザードマップ作成に必要な

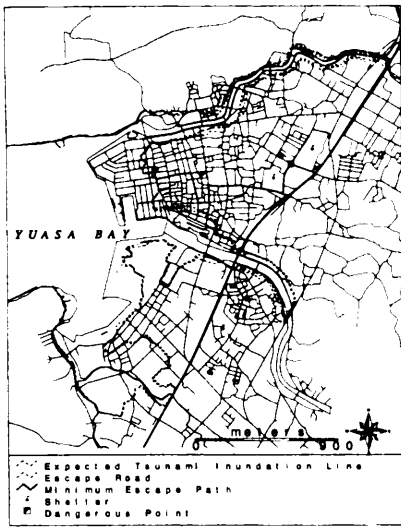


図-11 避難活用型ハザードマップ

情報が蓄積されているので、ハザードマップの使用目的に応じて必要な情報だけをデータベースから呼び出してそれを表示すればよい。ここでは、避難活用型のハザードマップを作成し、その結果を図-11に示した。

以上、地理情報システム (GIS) を用いた津波ハザードマップの作成方法を示した。GIS を用いると、津波の伝播・氾濫特性などの情報の管理がしやすく、その情報を用いてハザードマップに必要となるさまざまな情報が得られることがわかった。さらに、ハザードマップの活用目的に応じて、その目的に必要な情報だけを簡単に表示できることもわかった。ここでは、情報を加工・処理する際には、ある条件を設定するだけで単純に情報を処理した。しかし、実際の災害では人の意思決定やその行動の影響も大きいと考えられる。したがって、人間的な影響を考慮したモデルを構築し、ハザードマップ作成における情報の加工・処理のプロセスにそれを組み入れることが今後の課題となるであろう。

5. 結 語

ここでは、津波シミュレーション方法とそのハザードマップ作成方法を示した。津波シミュレーション法としては、その精度を向上させるために有限要素法を採用した。その結果、以下のことが明らかとなった。

津波氾濫解析対象領域に小河川や蛇行した河川がある場合には、差分法で解析しようとする必要以上にメッシュの大きさを細かく取る必要があるため、計算効率が悪くなる。しかし、有限要素法ではメッシュの大きさおよび方向は自由に構成できるので、計算効率の改善が期待できる。実際に、有限要素法を用いて1946年南海津波

の再現計算を行ったところ、差分法では再現できなかった氾濫域を、有限要素法モデルではうまく再現することができた。この結果と、ハザードマップ作成に利用するために行う津波シミュレーションでは細かい氾濫情報が必要であることを考慮すると、そのシミュレーション法には有限要素法が適しているといえる。

さらに、このモデルを用いて津波の伝播・氾濫特性を明らかにして、その結果に基づいてハザードマップを作成する方法を示した。その際には、情報を管理するツールとして地理情報システム (GIS) を利用した。その結果、以下のことが明らかとなった。

数値シミュレーションによって求められた津波の伝播・氾濫特性はデジタルデータであるから、これをそのまま GIS に入力すれば変換の誤差なく情報を利用することができる。しかも、GIS の各種解析機能を用いれば、津波の伝播・氾濫特性の情報に基づいて避難場所や避難経路の選定が効率的に行うことができる。さらに、GIS はデータベース機能も備えているので、ハザードマップの使用目的に応じて、その目的に必要なデータだけを表示することができる。

本研究で用いた海洋の水深データは、日本海洋データセンターに、さらに和歌山県湯浅町・広川町の1:2,500の都市計画図は、和歌山県土木部河川課を通して提供していただき、謝意を表する。

参 考 文 献

- 相田 勇 (1977): 陸上に溢れる津波の数値実験—高知県須崎および宇佐の場合—, 東大地震研究所彙報, Vol. 52, pp. 441-460.
- 相田 勇 (1981): 南海道沖の津波の数値実験, 東大地震研究所彙報, Vol. 56, pp. 713-730.
- 相田 勇・羽鳥徳太郎 (1983): 和歌山県, 湯浅・広川両町に遡上した津波の数値実験, 東大地震研究所彙報, Vol. 58, pp. 667-681.
- 河田忠昭・小池信昭・島田富美男 (1994): 津波の伝播特性に基づく危険度評価について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 1181-1185.
- 土木学会水理委員会 (1985): 水理公式集—昭和60年版—, 土木学会, pp. 283-287.
- 羽鳥徳太郎・相田 勇・坂下至功・日比谷紀之 (1983): 和歌山県湯浅・広に遡上した南海道津波の調査—1946年南海道および宝永・安政津波について—, 東大地震研究所彙報, Vol. 58, pp. 187-206.
- 日野幹雄 (1987): 開放境界における波の無反射透過条件の極めて簡単な計算スキームの提案, 東京工業大学土木工学科研究報告, No. 38, pp. 33-37.
- Mansinha, L and D. E. Smylie (1971): The displacement fields of inclined faults, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.
- Xanthopoulos, T. and C. Koutitas (1976): Numerical Simulation of a Two Dimensional Flood Wave Propagation Due to Dam Failure, Jour. of Hydraulic Research, Vol. 14, No. 2, pp. 321-331.