

津波災害のハザードマップについて

河田恵昭・小池信昭*

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

津波による人的被害を軽減するためには、津波の正確な知識の普及と浸水危険地域からの迅速な避難が重要であり、そのために津波常襲地域においてハザードマップを作成することが急務となっている。ここでは、数値計算方法としてメッシュ構成や境界条件設定に柔軟性のある有限要素法を採用し、その適用性を明らかにした。そして、このモデルを用いて津波の伝播・氾濫特性を詳しく調べ、その結果を地理情報システム(GIS)で管理して津波ハザードマップを作成する方法を明らかにした。

キーワード：避難、ハザードマップ、津波災害、有限要素法、地理情報システム

1. 緒 言

津波という災害は、たとえば、三陸海岸のような津波常襲地域でも30～50年に一度という低頻度であるから、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だんだんと減っていくし、その知識もまた受け継がれにくいからである。また、必ずしも経験が一般化されていない。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、それを知識として住民に普及することが必要である。そのためには、津波ハザードマップを作成して利用することが効果的であると考えられる。ハザードマップを作成するための津波の諸特性を求めるには、数値シミュレーションによる方法が有効であり、すでに津波の到達時間や最大高さなどの伝播特性については、たとえば河田ら(1994)の研究にその方法論が提案されている。それは、地震の断層モデルを海底トラフ沿いに移動して計算することにより、既往の津波の規模を上回る最悪の場合を調べるというものであった。一方、津波の氾濫計算については、相田(1977)の研究を発端として、これまで

に数多くの研究が行われている。しかし、それらの多くは過去の津波氾濫の再現計算であって、この方法をそのまま現在の地理条件に当てはめて氾濫特性を計算することは少なからず問題があると考えられる。すなわち、現在では臨海地域に、津波・高潮対策としての防災構造物がある場合が多く、これらを突破して都市の正面から大津波に襲われる可能性は小さい。ただし、非常襲地域では起こる。1983年日本海中部地震津波や1993年北海道南西沖地震津波による災害がその例である。むしろ、津波が河川を遡上して街の背後から氾濫して被害が生じたり、あるいは通常では予想もつかないようなところから氾濫する可能性がある。このような状況を考慮すると、現在の地理条件で津波の氾濫シミュレーションを行うためには、メッシュを細かく取って地理条件を詳しく再現するばかりでなく、防波堤・防潮堤・海岸堤防などの複雑な条件も取り入れ、なおかつ小河川および排水路などもメッシュに取り込む必要がある。津波の数値計算方法としては通常差分法が用いられるが、原則として等間隔の格子状にメッシュを組む必要があるため、上の条件を取り込むことにはおのずと限界があると考えられる。とくに、河川が曲がりくねっている場合には、差分メッシュでは河川の法線形状の変化を十分に表現できず、そのために過去の

研究でも氾濫域の再現がうまくいかない場合がみられた。

そこで、このような問題に対処するために、津波氾濫シミュレーションに用いる数値計算法として、有限要素法を採用することにした。有限要素法の長所として、メッシュの大きさを自由に換えられる、複雑な境界条件を比較的容易に導入することができるなど柔軟性に富んでいることがあげられる。したがって、前述した問題点を解決する手法として適していると言える。しかし、氾濫水の数値計算法として用いられることは少ないため、まだ多くの問題点を残していることも事実である。たとえば、陽的な計算とするために導入される集中係数の選定、氾濫水の先端部の境界条件の取り方などがある。

一方、津波ハザードマップに関しては、その作成方法は各自治体によってまちまちであり、そのすべてに必要な情報が記載されているとは言えないのが現状である。それは津波ハザードマップ作成マニュアルが欠如しているからであり、ここでその作成方法を明確にすることは重要なことであると考えられる。

ここでは、まず、海域、河道および氾濫域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・氾濫特性をこのモデルを用いて計算する。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。さらに、そこで生じる問題点について考察することにする。

2. 津波シミュレーション方法

津波氾濫シミュレーションに用いる数値計算方法として有限要素法を採用したが、津波の波源域となる外海から氾濫域までの伝播計算には一般によく用いられるスタグガードメッシュによるリープフロッグ差分法を用いた。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。ここでは、まず、Navier-Stokes の方程式から導かれる津波伝播・氾濫計算の基礎方程式について述べる。そして、スタグガードリープフロッグ差分法による津波伝播計算方法について説明し、その後有限要素法による津波氾濫計算方法を説明することにする。

2.1 基礎方程式

津波のような現象は、鉛直運動が水平運動に比べて十分小さいと考えることができる。すなわち、長

波近似を行い、圧力を静水圧分布と仮定して Navier-Stokes の方程式を海底から自由水面まで鉛直方向に積分すると、以下のような基礎方程式が導かれる。

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

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

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

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

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 :マニングの粗度係数である。

2.2 津波伝播計算方法

(1) 差分式

式(1)~(3)をスタグガードリープフロッグ差分法で差分化すると以下ようになる。

$$\begin{aligned} h_{i,j}^{k+1} &= h_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} (H_{i,j}^k u_{i+1/2,j}^{k+1/2} - H_{i,j}^k u_{i-1/2,j}^{k+1/2}) \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} (H_{i,j}^k v_{i,j+1/2}^{k+1/2} - H_{i,j}^k v_{i,j-1/2}^{k+1/2}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u_{i+1/2,j}^{k+3/2} &= v_{i+1/2,j}^{k+1/2} - \frac{\Delta t}{\Delta x} g (h_{i+1,j}^{k+1} - h_{i,j}^{k+1}) \\ &\quad - \Delta t u_{i+1/2,j}^{k+1/2} \frac{g(n_{i,j})^2 \sqrt{(u_{i+1/2,j}^{k+1/2})^2 + (v_{i+1/2,j}^{k+1/2})^2}}{(H_{i,j}^{k+1})^{4/3}} \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta x} u_{i+1/2,j}^{k+1/2} \begin{cases} u_{i+3/2,j}^{k+1/2} - v_{i+1/2,j}^{k+1/2} (u_{i+1/2,j}^{k+1/2} < 0) \\ u_{i+1/2,j}^{k+1/2} - v_{i-1/2,j}^{k+1/2} (u_{i+1/2,j}^{k+1/2} \geq 0) \end{cases} \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} v_{i,j+1/2}^{k+1/2} \begin{cases} u_{i+1/2,j+1}^{k+1/2} - v_{i+1/2,j}^{k+1/2} (v_{i,j+1/2}^{k+1/2} < 0) \\ u_{i+1/2,j}^{k+1/2} - v_{i+1/2,j-1}^{k+1/2} (v_{i,j+1/2}^{k+1/2} \geq 0) \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v_{i,j+1/2}^{k+3/2} &= u_{i,j+1/2}^{k+1/2} - \frac{\Delta t}{\Delta y} g (h_{i,j+1}^{k+1} - h_{i,j}^{k+1}) \\ &\quad - \Delta t v_{i,j+1/2}^{k+1/2} \frac{g(n_{i,j})^2 \sqrt{(u_{i+1/2,j}^{k+1/2})^2 + (v_{i,j+1/2}^{k+1/2})^2}}{(H_{i,j}^{k+1})^{4/3}} \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta x} u_{i+1/2,j}^{k+1/2} \begin{cases} v_{i+1,j+1/2}^{k+1/2} - v_{i,j+1/2}^{k+1/2} (u_{i+1/2,j}^{k+1/2} < 0) \\ v_{i,j+1/2}^{k+1/2} - v_{i-1,j+1/2}^{k+1/2} (u_{i+1/2,j}^{k+1/2} \geq 0) \end{cases} \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} v_{i,j+1/2}^{k+1/2} \begin{cases} v_{i,j+3/2}^{k+1/2} - v_{i,j+1/2}^{k+1/2} (v_{i,j+1/2}^{k+1/2} < 0) \\ v_{i,j+1/2}^{k+1/2} - v_{i,j-1/2}^{k+1/2} (v_{i,j+1/2}^{k+1/2} \geq 0) \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、上添字は時間を、下添字は空間メッシュ番号を表す。

(2) 初期条件

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。

海底地盤変動量を海面上に与える際には、変動全体が瞬時に完了するものとする。

(3) 境界条件

陸地との境界では、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(1987)の無反射境界条件を用いることにする。

2.3 津波氾濫計算方法

(1) 有限要素法

ここでは、有限要素法による洪水氾濫の既往の研究(たとえば、岡, 1992)を参考にして、数値計算方法を説明する。

(a) ガラーキン法による空間方向の離散化

解析領域を有限個の要素に分割し、各要素について以下に表されるような区分的に連続な近似関数を定義する。

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ h \\ H \end{Bmatrix} = \sum_{\beta=1}^n N_{\beta}(x, y) \begin{Bmatrix} u_{\beta} \\ v_{\beta} \\ h_{\beta} \\ H_{\beta} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ここに、 N :要素の節点数、 $u_{\beta}, v_{\beta}, h_{\beta}, H_{\beta}$: u, v, h, H の節点 β の値、 $N_{\beta}(x, y)$:形状関数である。

式(8)を式(1)~(3)に代入した後、その時に生ずる残差に重み関数を乗じて、ガラーキン法に基づいて離散化を行うと、式(9)~(11)を得る。

$$\sum_1^N \{ M_{ij} h_j^* + H_k^* (K_{ikj}^x + K_{ikj}^z) u_j + H_k^* (K_{ikj}^y + K_{ikj}^v) v_j \} = 0 \quad (9)$$

$$\sum_1^N \{ M_{ij} u_j^* + K_{ikj}^x u_k^* u_j + K_{ikj}^y v_k^* u_j + g L_{ij}^x h_j + M_{ij} R^* u_j \} = 0 \quad (10)$$

$$\sum_1^N \{ M_{ij} v_j^* + K_{ikj}^x u_k^* v_j + K_{ikj}^y v_k^* v_j + g L_{ij}^y h_j + M_{ij} R^* v_j \} = 0 \quad (11)$$

ただし、

$$M_{ij} = \int_{A_e} N_i N_j dA_e \quad (12)$$

$$K_{ikj}^x = \int_{A_e} N_i N_k (N_x)_j dA_e \quad (13)$$

$$K_{ikj}^y = \int_{A_e} N_i N_k (N_y)_j dA_e \quad (14)$$

$$L_{ij}^x = \int_{A_e} N_i (N_x)_j dA_e \quad (15)$$

$$L_{ij}^y = \int_{A_e} N_i (N_y)_j dA_e \quad (16)$$

ここに、 $N_x = \partial N / \partial x$, $N_y = \partial N / \partial y$, A_e :要素 e の面積、 i, j, k :節点番号である。

式(9)~式(11)は、マトリックスを用いて以下のようにならめられる。

$$[M]\{\dot{S}\} + [Q]\{S\} = \{F\} \quad (17)$$

ここで、

$$\{S\} = \begin{pmatrix} h \\ u \\ v \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\{\dot{S}\} = \begin{pmatrix} \frac{\partial h}{\partial t} \\ \frac{\partial u}{\partial t} \\ \frac{\partial v}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{h} \\ \dot{u} \\ \dot{v} \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\{F\} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_{ij} & 0 & 0 \\ 0 & M_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & M_{ij} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} 0 & H_k^* (K_{ikj}^x + K_{ikj}^z) \\ g L_{ij}^x & (K_{ikj}^x u_k^* + K_{ikj}^y v_k^* + M_{ij} R^*) \\ g L_{ij}^y & 0 \\ H_k^* (K_{ikj}^y + K_{ikj}^v) & \\ 0 & \\ (K_{ikj}^x u_k^* + K_{ikj}^y v_k^* + M_{ij} R^*) & \end{bmatrix} \quad (22)$$

解析領域を三角形要素を用いて分割し、形状関数に式(23)を用いると、式(12)~(16)は式(24)~(28)のように表される。

$$N_i = \frac{a_i + b_i x + c_i y}{2\Delta} \quad (23)$$

$$M_{ij} = \begin{cases} \frac{\Delta}{6} & (i = j) \\ \frac{\Delta}{12} & (i \neq j) \end{cases} \quad (24)$$

$$K_{ikj}^x = \begin{cases} \frac{b_k}{12} & (i = j) \\ \frac{b_k}{24} & (i \neq j) \end{cases} \quad (25)$$

$$K_{ikj}^y = \begin{cases} \frac{c_k}{12} & (i = j) \\ \frac{c_k}{24} & (i \neq j) \end{cases} \quad (26)$$

$$L_{ij}^x = \frac{b_j}{6} \quad (27)$$

$$L_{ij}^y = \frac{c_j}{6} \quad (28)$$

ここに、 $b_i = y_j - y_k$, $c_i = x_k - x_j$, Δ :三角形要素の面積である。

(b) 時間方向の離散化

ガラーキン法によって空間方向に離散化された有限要素方程式(17)は、時間に関して連立常微分方程式である。この連立常微分方程式は、差分法によって時間方向に離散化される。式(17)をそのまま差分法を用いて解く場合には、逆行列を求める必要があるため、非常に多くの計算時間がかかる。しかし、陰的解法であるため安定性に優れている。一方、陽的解法は安定性の検討が必要になるが、逆行列を求める必要がないので、陰的解法に比べて非常に高速に計算することができる。ここでは、川原ら(1976)によって導入された集中係数を用いて、式(17)を陽的に解くことにする。

式(17)の $[M]$ において、各行の係数の和を対角項の係数、非対角項の係数を0として、式(29)に示すように係数の集中化を行い、さらに式(30)で表される集中係数 e を導入する。

$$[\bar{M}] = \frac{\Delta}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$[\hat{M}] = e[\bar{M}] + (1-e)[M] \quad (30)$$

さらに、陽的解法として、多段階法である2段階Lax-Wendroff法を用いることにすると、式(17)は以下ようになる。

$$[\bar{M}]S^{n+1/2} = [\hat{M}]S^n - \frac{1}{2}\Delta t[Q]^n S^n \quad (31)$$

$$[\bar{M}]S^{n+1} = [\hat{M}]S^n - \Delta t[Q]^{n+1/2} S^{n+1/2} \quad (32)$$

この式によって、有限要素法の計算を陽的に行うことができる。

(2) 初期条件

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。

$$\left. \begin{array}{l} h = h_0 \\ u = u_0 \\ v = v_0 \end{array} \right\} \text{ at } t = 0 \quad (33)$$

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。

(3) 境界条件

外海との境界 S_1 では、津波伝播計算によって求めた $h_{\text{given}}, u_{\text{given}}, v_{\text{given}}$ が与えられる。すなわち、

$$\left. \begin{array}{l} h = h_{\text{given}} \\ u = u_{\text{given}} \\ v = v_{\text{given}} \end{array} \right\} \text{ on } S_1 \quad (34)$$

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。すなわち、

$$u_n = ul + vm = 0 \quad \text{on } S_2 \quad (35)$$

ここに、 l, m は境界 S_2 の方向余弦である。

(4) 先端条件

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、

$$q = C_0 H \sqrt{gH} \quad (36)$$

の関係があるものとして計算する。ここに、 H :浸水深、 g :重力加速度であって、 C_0 を $C_0 = 0.5$ と仮定した。

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。

(5) 越流条件

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(土木学会水理委員会, 1985)を用いる。すなわち、

$$q = Ch^{3/2} \quad (37)$$

$$C = 1.785 + \left(\frac{0.00295}{h} + 0.237 \frac{h}{W} \right) (1 + \epsilon) \quad (38)$$

ここに、 q :単位幅あたりの越流量、 h :越流水深、 C :流量係数、 W :せき高、 ϵ :補正項で、 $W \leq 1$ のとき $\epsilon = 0$ 、 $W > 1$ のとき $\epsilon = 0.55(W - 1)$ 。

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、中間の台形せきの公式(土木学会水理委員会, 1985)を用いる。すなわち、

$$q = C_0 h^{3/2} \quad (39)$$

$$C_0 = 1.37 + 1.02 \frac{h}{W} \quad (40)$$

ここに、 q :単位幅あたりの越流量、 h :越流水深、 C_0 :完全流量係数、 W :せき高。

(6) 等価粗度係数

市街地の家屋群中に氾濫水が通過する場合、正確な浸水深を予測するためには、本来、市街地家屋群の影響を考慮して数値計算を行う必要がある。しかし、従来から適当な等価摩擦係数や等価粗度係数を与えることで、市街地家屋群の影響を数値計算に組み入れてきた。たとえば、中川ら(1985)は、家屋の密集度の違いによってその密集度に応じた適当な等価粗度係数を与えることで、家屋群の影響をある程度考慮した計算が行えることを示している。

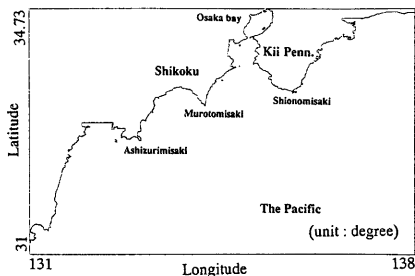


Fig. 1 Numerical simulation area of tsunami propagation (wide area)

3. 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。

3.1 計算領域と計算時間

まず、津波伝播計算の計算領域は、広領域ではFig.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Fig.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、水深データは日本海洋データセンターから提供されたものを使用し、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Fig.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Fig.4のように、できかぎり地形形状を再現するように努めた。地盤高は1:2500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。

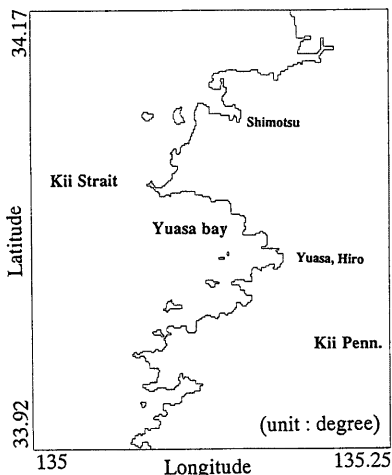


Fig. 2 Numerical simulation area of tsunami propagation (narrow area)

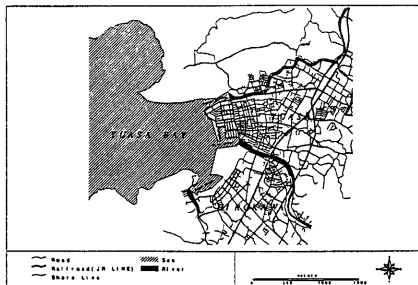


Fig. 3 Numerical simulation area of tsunami inundation

3.2 地震断層モデル

ここで使用した地震断層モデルは、相田(1981)のModel19'である。その断層パラメーターをTable 1に、断層の位置をFig.5に示した。なお、海底地盤変動量を海面上に与える際には、変動全体が瞬時に完了するものとした。

3.3 計算に用いた係数の値

まず、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、 $e=0.7\sim0.95$ 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

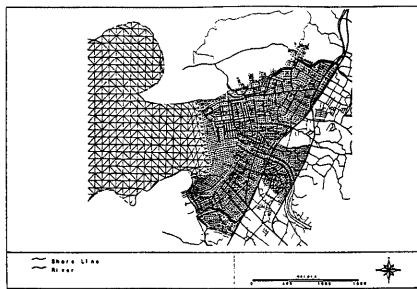


Fig. 4 Tsunami inundation simulation with FEM

Table 1 Parameters of fault model

Tsunami Fault Model	1946 Nankai AIDA's Model 19'		1854 Ansei AIDA's Model 20''	
	E part	W part	E part	W part
L (km)	150	120	150	150
w (km)	70	120	70	120
δ (°)	10	20	10	20
ϕ (°)	N20W	N20W	N20W	N20W
z (km)	10	1	10	1
u_r (km)	2.41	1.21	3.21	3.21
u_d (km)	3.22	4.83	4.28	6.42

L : fault length, w : fault width, δ : dip angle, ϕ : dip direction, z : depth of the upper rim of the fault plane, u_r : strike slip component (right lateral); u_d : dip slip component (reverse).

よび河道では $n = 0.020$, 陸上では $n = 0.025$ を用いた。また、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地域の粗度係数 $n_e = 0.067$ を用いることにした。

3.4 計算結果

Fig.6は、相田ら(1983)による再現計算結果である。相田らの計算結果は、測量値と良い一致を示しているが、図の下部にある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氾濫域よりもかなり小さくなっている。すなわち、差分メッシュでは小河川をメッシュに組み入れることはできないし、たとえ組み入れられるほどメッシュを小さくしても、江上川

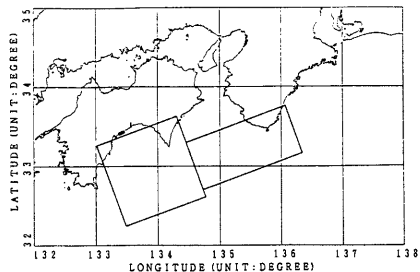


Fig. 5 Fault model Model19' of the 1946 Nankai Earthquake proposed by Aida

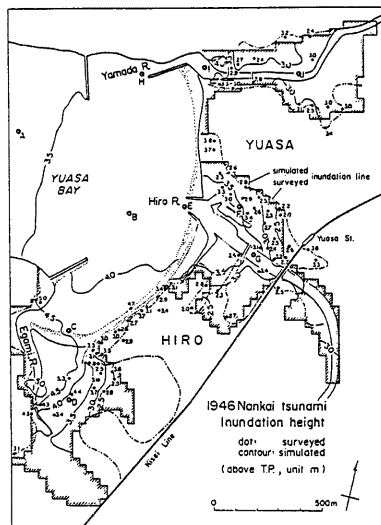


Fig. 6 Spatial distribution of maximum inundation depth due to the 1946 Nankai earthquake tsunamis (by Aida et al., 1983)

支流のように河川が蛇行している場合にはさらに細かくしなければ、河川の流れを再現することはできない。本研究で有限要素法を採用した一番の理由がこのことである。

一方、Fig.7が有限要素法で計算した津波の最大浸水深のコンター図を、羽鳥ら(1983)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。これを見ると、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が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

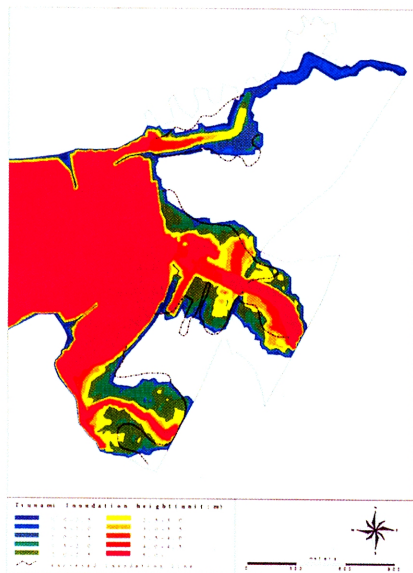


Fig. 7 Spatial distribution of maximum inundation depth due to the 1946 Nankai earthquake tsunamis

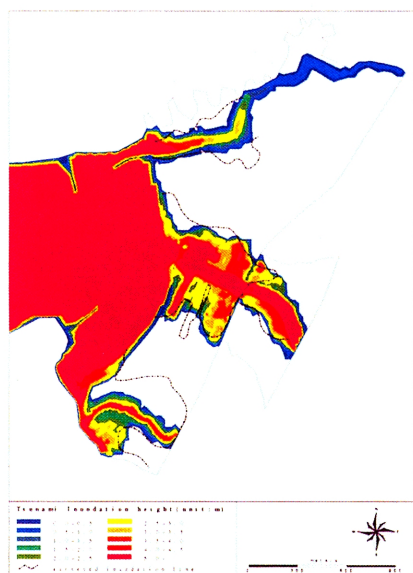


Fig. 8 Spatial distribution of maximum inundation depth due to the 1946 Nankai Earthquake tsunamis (leading edge condition: no flow across walls)

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。しかし、今回の計算では、図の中央部にある広川流域の計算結果が測量値によるものよりも大きくなってしまっている。その分、図の上部にある山田川では、計算結果がやや小さくなってしまっている。すなわち、津波が広川にかなり流れ込んだため、本来山田川に流れ込むはずの分が減ったと考えることができる。その原因は、メッシュを構成するときに現在の地形図から読みとったために、広川では1946年当時の河川の幅よりも大きい幅で計算してしまったためと考えられる。

Fig.8は、先端条件を一般の氾濫計算と同様にして、すなわち氾濫水の先端ではそこを横切る流速は0であるとして計算した場合のコンター図である。これを見ると、ここでは江上川流域の氾濫域は、測量値による氾濫域よりもかなり小さくなってしまっている。広川については、だいたい一致しているものの、先程の考察に従えば、広川の計算メッシュが広く取っており、実際よりも津波が多く氾濫しているため、身かけ上は一致しているように見えるだけであろう。山田川についても計算結果は測量値によるものよりも小さくなっていて、

3.5 考 察

以上、有限要素法による津波氾濫計算において、先端条件を変えて2つの場合について計算した。その結果、相田の先端条件を用いた結果は痕跡値と良好な一致を示したが、一般の氾濫計算に用いられる氾濫水の先端の境界に垂直な流速を0とする先端条件を用いた場合には、痕跡値よりもかなり小さい結果となった。このことは、津波という現象は陸上に遡上するときも大きなエネルギーをもっているため、先端条件として流速を与えてやる必要があるということを示唆しているものと考えられる。しかし、現在のように防潮堤などによって津波が正面から遡上する可能性が少なくとみなせる場合には、すなわち防潮堤を津波が越流するような場合には、その後の現象は遡上というよりも洪水における氾濫と同様とみなせるのではないかと考えられる。すなわち、相田の先端条件を用いて1946年南海津波の再現計算がうまくいったのは、当時の地形が越流するような状態ではなくて、ほとんど遡上とみなせるような状態にあったからであろう。したがって、再現計算ではなくて現在の地理条件を用いて津波の氾濫計算を行うような場合には、津波が遡上する部分と氾濫する部分とで、先端条件を使い分ける必要があると思われる。今回、この問題については十分な検討

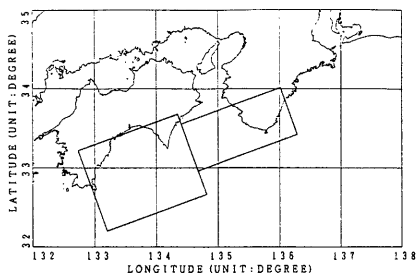


Fig. 9 Fault model Model20^o due to the 1854 Ansei Nankai Earthquake proposed by Aida

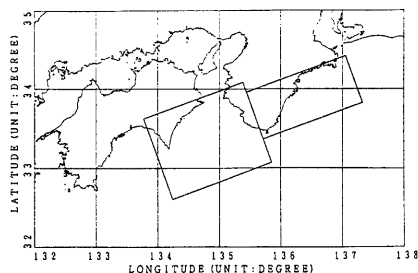


Fig. 10 Fault model "Fault9" due to plausible maximum earthquake proposed by Kawata et al.

ができなかったが、津波ハザードマップ作成のための津波氾濫計算を行うためには、早急にこの課題に取り組む必要があろう。

4. 津波の伝播・氾濫特性に基づくハザードマップの作成

ここでは、まず、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。想定地震としては、2つの場合を考えた。すなわち、1つは1854年の安政南海道地震について計算した。その際には、相田(1981)のModel20^oを断層モデルとして使用した。その断層パラメーターをTable 1に、断層の位置をFig.9に示した。つぎに、最悪の場合を考えて、河田ら(1994)の研究に従い、この断層モデルを移動したときに最大となるFault9の位置に断層がある場合について計算した。Fault9の断層パラメーターはModel20^oと同じであり、断層の位置をFig.10に示した。いずれの場合にも、潮位が満潮の場合についてシミュレーションを行った。そして、それぞれの場合について津波の伝播・氾濫特性を詳しく調べた。ここでは、便宜的に、想定地震として1854年の安政南海道地震を用いたものを単に安政津波、Fault9を用いたものをMax津波と呼ぶことにする。

つぎに、このようにして求めた津波の伝播・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示した。そこでは、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、地理情報というデジタル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。

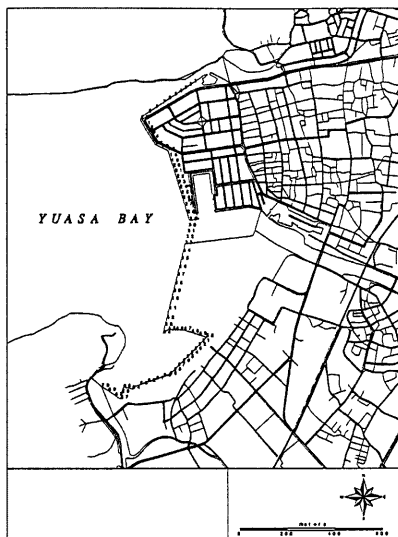


Fig. 11 Output points of numerical simulation

4.1 津波の伝播・氾濫特性

(1) 最大水位分布図

まず、伝播特性の1つである津波の最大水位を調べた。この場合、最大水位とは、津波が陸上に氾濫する前の平均海面からの水位を表す。計算結果を出力する地点を、Fig.11に、1~70までの番号で示した。Fig.12は、安政津波およびMax津波における最大水位の計算結果を、出力地点を横軸に津波の最大水位を縦軸に取って、その地点における防潮堤の高さとともにグラフにしたものである。両方の津波の結果を比較すると、Max津波の方がいくぶん水位が高い場所があるが、ほぼ同じとみなせる。ほとんどすべての場所で、6m以上もの高さになっており、し

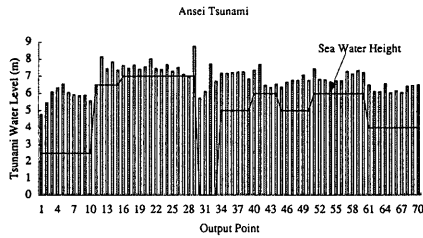


Fig. 12 Distribution of maximum water level

かも防潮堤の高さを超えている。そこで、最大水位から防潮堤の高さを引いた高さをグラフにしたものが、Fig.13である。マイナスになった場所や河川の部分は0として表示してある。これを見ると、出力地点番号1～10の山田川河口付近、61～70の江上川河口付近でその高さが大きいことがわかる。すなわち、このことは、津波は中央正面の広川付近から氾濫するよりも、その両側の山田川および江上川河口付近から氾濫する可能性があることを示唆している。

さらに、江上川の河口に大きな防潮水門があるが、これが閉まっていた場合にどのようなことになるかについても調べた。Fig.14は、Fig.12と同様に、最大水位の計算結果をグラフにしたものである。Fig.12と比較すると、江上川に津波が流入しない分、広川と山田川付近の水位が大きくなると予想したが、結果は安政津波についてはほとんど変化なし、Max津波ではむしろ若干小さくなってしまったようである。この理由についてははっきりとわからないが、津波は防潮水門を超えてしまうので、水位に関してはそれほど変化しなかったのだと推察される。Fig.15は、Fig.13と同様に最大水位から防潮堤の高さを引いた高さをグラフにしたものであるが、目立った変化は見られなかった。

(2) 最短到達時間

ここでは、津波の最短到達時間を求めた。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した。Fig.16は、安政津波とMax津波の水位変化

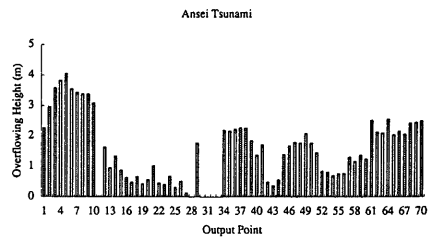


Fig. 13 Distribution of maximum differential water level over crown height of embankment

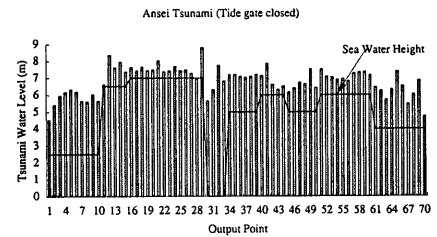


Fig. 14 Distribution of maximum water level (storm surge gate is closed)

をグラフにしたものである。安政津波の到達時間は約47分である。Max津波の到達時間はグラフからは判断が難しいが、約7mの津波の前に約3mの津波が到達しているようにも見えるので、ここを到達時間として採用すると約30分で到達することになる。し

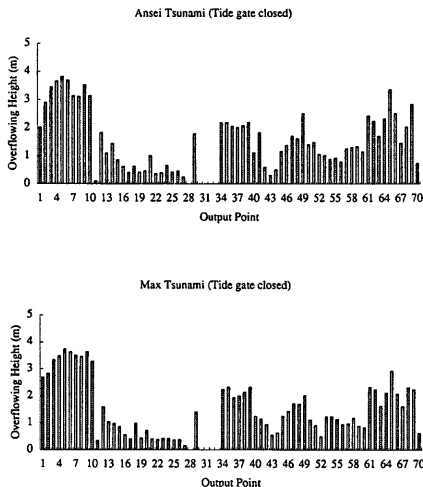


Fig. 15 Distribution of maximum differential water level over crown height of embankment (storm surge gate is closed)

たがって、この地域の津波最短到達時間は、約30分とすることができる。

(3) 最大浸水深分布図

津波の氾濫特性の1つとして、まず、最大浸水深分布を求めた。Fig.17および18は、それぞれ安政津波およびMax津波における最大浸水深分布図である。図中下部にある江上川流域では両方の津波でそれほど差はないが、中央部にある広川の河口から少し入ったところと湯浅町の埋め立て地では、Max津波の方が氾濫しているのが見られる。これらの図から、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ごく近くは氾濫している。また、Fig.19および20は、江上川河口の防潮堤が閉まっている場合の安政津波およびMax津波における最大浸水深分布図である。これらをFig.17および18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、その分の流量が別の場所に流れて、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、もっとも最大浸水深が大きいのは、防潮堤が閉まっていない場合のMax津波の場合であるので、ハザードマップ作成のために用いる最大浸水深分布図としてはFig.18を用いることにする。

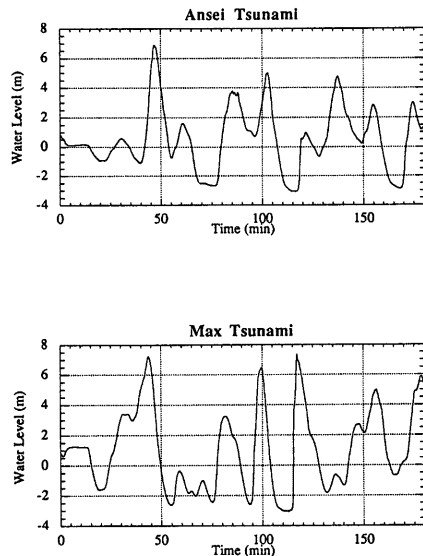


Fig. 16 Changes of water level with time

(4) 流速ベクトル分布図

津波の挙動を知るためには、流速ベクトル図が役に立つ。どのケースでも津波の挙動はそれほど変わらなかったの、ここではMax津波の場合についてのみ取り上げることにする。Fig.21は地震後50分後のMax津波の流速ベクトル図、Fig.22は52分後のそれである。これらを見ると、湯浅川の埋め立て地では、最初は山田川の河口部の防潮堤が低い部分から越流して氾濫しているが、その2分後には埋め立て地の正面からも氾濫していることがわかる。江上川流域では、江上川の河口が海から見るとかなり回り込んだところにあるので、河道よりもその横の部分から津波が越流して氾濫していることがわかる。広川では、津波は氾濫しないのでそのまま進んでゆくようである。

4.2 津波ハザードマップについて

建設省河川局治水課(1994)は、洪水ハザードマップ作成要領及び解説書を作成し、洪水ハザードマップを早期に作成するよう各市町村に促している。このなかで特徴的であるのは、ハザードマップを活用目的に応じて、「避難活用型」、「防災情報型」、「災害学習型」の3種類に分類していることである。

ここでは、まず、この作成要領を参考にしながら、ハザードマップ作成の共通事項についてまとめることにする。一方、津波災害は時間的要因が卓越する

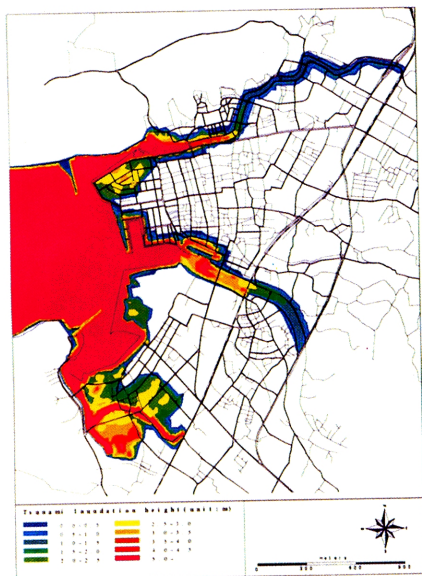


Fig. 17 Spatial distribution of maximum inundation depth due to the 1854 Ansei Nankai Earthquake tsunamis

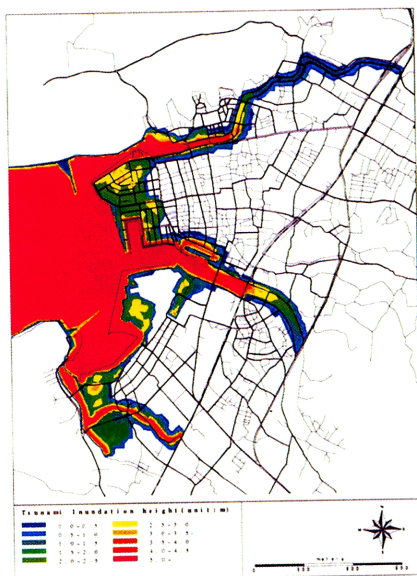


Fig. 19 Spatial distribution of maximum inundation depth due to the 1854 Ansei Nankai Earthquake tsunamis (storm surge gate is closed)

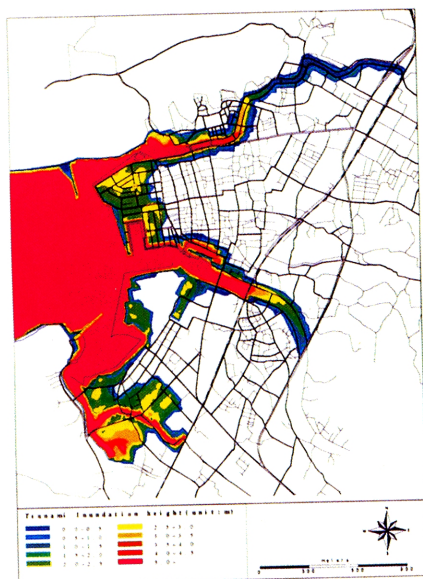


Fig. 18 Spatial distribution of maximum inundation depth due to the plausible maximum tsunamis

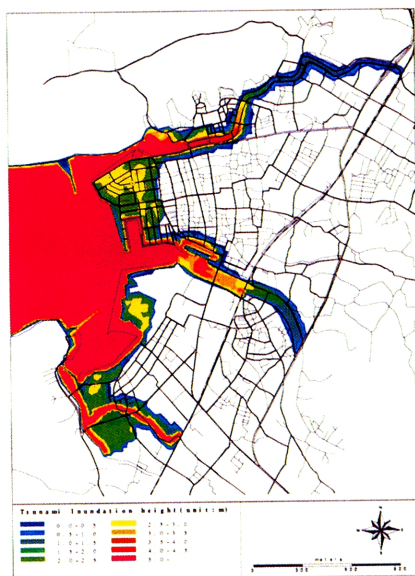


Fig. 20 Spatial distribution of maximum inundation depth due to the plausible maximum earthquake tsunamis (storm surge gate is closed)

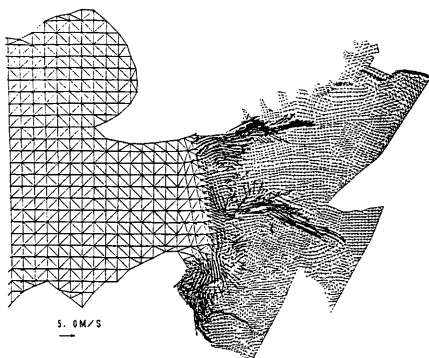


Fig. 21 Spatial distribution of flow vector due to the plausible maximum tsunamis (after 50 minutes of earthquake)

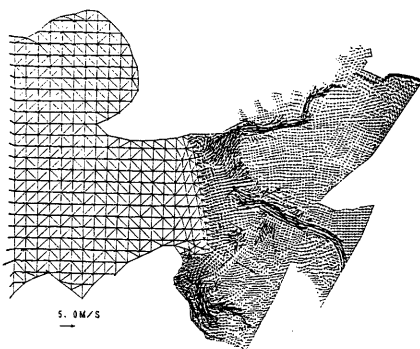


Fig. 22 Spatial distribution of flow vector due to the plausible maximum tsunamis (after 52 minutes of earthquake)

災害であると考えられる。つまり、津波防災とくに問題となるのは、警報伝達や避難に関することである。したがって、津波ハザードマップでは、とくにそれらに関する情報に注意する必要がある。

(1) 総論

(a) 目的

ハザードマップは、災害の外力の大きさ、予想される被害の大きさおよび避難情報などの防災に関する情報をわかりやすく地図上に表示して、ソフト面での防災に役立てるためのものと考えることができる。

(b) 定義

ハザードマップには、一般に明確な定義が存在するわけではない。呼び方も、防災マップ、災害地図な

どがあり、同じような内容のものがさまざまな名称で呼ばれているのが現状である。とりあえず、ここでは、ハザードマップとは防災に役立つ情報がわかりやすく表示されている地図と定義することにする。

(c) 種類

ハザードマップは、その活用目的に応じていくつかのものを作成することが望ましい。なぜなら、1枚の地図に表示できる情報は限られており、状況によっては必要のない情報が本当に必要な情報を得る妨げになることがあると考えられるからである。洪水ハザードマップ作成要領及び解説書では、「避難活用型」、「防災情報型」、「災害学習型」の3種類に分類している。ここでも、ハザードマップの種類としては、これに準ずることとする。

(c)-1 避難活用型ハザードマップ 災害発生時の避難の際に活用することを目的としたものであるため、避難に必要な情報だけを記載した地図と考えることができる。警報伝達経路や避難時期についても記述してあることが望ましい。

(c)-2 防災情報型ハザードマップ 防災対策全般にわたる情報を記載した地図であり、災害時の避難誘導活動から救護活動、復旧活動など広い範囲にわたって役立つ情報が必要であろう。

(c)-3 災害学習型ハザードマップ 学校などの災害教育に活用する冊子で、住民への災害に対する知識の普及を目的とするものと考えられる。災害発生のメカニズムや被災の歴史などについても記述する方が望ましい。

4.3 ハザードマップに必要な情報

(1) 各種災害ハザードマップに共通の情報

(a) 地理情報

まず、どの種類のハザードマップにも必要な情報として、基図となる地理情報があげられる。できれば、都市計画図など1:2,500以上の大縮尺の地図から情報を得ることが望ましい。さらに、地理情報がデジタル化されていれば、後で取り上げる地図情報システム (GIS) を用いて情報を処理することができる。

(b) 危険区域

災害外力が作用して人がそこに留まっていることが危険であると予想される区域を、あらかじめ過去の災害実績やシミュレーションなどによって判断し、危険区域として指定しておく。

(c) 災害危険度

危険区域の中でも予想される被害に程度の差があったり、また危険区域外でもまったく安全というわけではなく、ある程度の被害が出ることもある。予想される被害の程度の差を危険度という指標で表し

ておけば、その程度に応じた対応をあらかじめ取ることもできるので、できるだけ災害危険度をハザードマップに記載するほうが望ましい。

(d) 避難場所

実際に災害が起こったときに役に立つ情報が避難場所の情報である。避難場所の選定には、上であげた危険区域外にある学校、公民館などの公共施設が適切である。ただし、避難し始める場所から適当な距離内になければならない。適当な避難場所が近くに見つけられない場合は、民間の施設や新たに避難場所を設置することも必要である。

(e) 避難経路

現状では、避難場所の設定はされていても、そこに至るまでの避難経路が明示されていない場合が多い。避難場所までの最短経路に危険箇所があることも考えられるので、安全に避難できる経路をあらかじめ指定しておくことが望ましい。

(f) 危険箇所

例えば、水害では土砂崩れや冠水する場所、地震では爆発物を取り扱う工場など、災害が生じたときにとくに危険となる箇所を抽出しておく。

(g) 災害実績

過去に生じた災害の被害実績に関する情報は、被害の推定をする上で役に立つ情報であると同時に、防災教育にとっても重要な事柄である。

(2) 津波防災に固有の情報

(a) 最大水位

この場合、最大水位とは津波が陸上に氾濫する手前の場所での平均海水面からの最大水位を表す。この情報がわかっていれば、最大浸水深という情報がなくてもある程度の被害予測が可能であるので、予算の都合などで氾濫シミュレーションができない場合には、最低限この情報は求めておくべきである。

(b) 最短到達時間

津波災害は時間的要因が卓越する災害であるので、この情報は非常に重要である。つまり、最短到達時間が10分以内の地域では、行政の避難勧告を待たずに自主避難をする必要がある。津波ハザードマップではこの情報は必須のものと認識すべきである。

(c) 最大浸水深と流速

津波が陸上に氾濫すると、そのエネルギーのためにすさまじい破壊力がある。そしてその大きさは浸水深と流速との関数で表すことができる。したがって、これらの情報によって被害予測をすることができる。

(d) 警報伝達経路

現在、津波警報の伝達経路には2つの方法があると考えられる。すなわち、1つは従来からの行政機関を通じて住民に伝達される経路であり、もう1つはテレビ、ラジオなどから直接住民に警報が伝達される場合である。マスコミを通じての警報伝達は、現在では地震が発生してから5分以内に伝達されるので非常に有効であるが、停電時には利用できない、またその地域に応じた内容を伝えることができないなどの欠点がある。一方、行政機関を通じて警報が伝達される場合は、住民に伝達されるまでに非常に時間がかかるという欠点がある。最近では、市町村が独自に衛星受信機を保有して警報をすばやく受け取り、それを住民に伝達するという方法を採用している自治体もある。いずれにしろ、警報伝達経路を明確にしておいた方が、住民が避難するかどうかの判断をしやすと考えられる。

(e) 避難勧告と自主避難

行政による避難勧告が発令されるまでには早くても10分かかり、それが住民に伝達され、そして避難に要する時間を考えると、避難勧告を聞いてから避難したのでは間に合わない場合も考えられる。したがって、地域によっては住民が自主的に避難する必要がある。それをハザードマップに記載して、住民が自主的に避難する必要があるのかどうかをあらかじめ明確にしておくことは、人的被害軽減の観点からとくに重要である。

4.4 津波ハザードマップ作成方法

ここでは、津波ハザードマップ作成に必要な情報を管理するのに地理情報システム (GIS) を使用することを前提にその作成方法を説明する。その大まかな作業の流れを図示すると、Fig.23のようになる。

(1) 情報の収集

(a) 地理情報

ハザードマップのもとになる基図を市町村から入手する。できれば、1:2,500以上の大縮尺の都市計画図などが望ましい。そして、地理情報システム (GIS) を利用する際には、基図をデジタル化してそれをGISで利用できるようにする必要がある。場所によっては国土数値情報を利用することもできるが、そうでない場合には基図から地理情報をデジタルイザーなどの入力装置で読みとる必要がある。さらに、津波の諸特性を求めるための数値シミュレーションを行うためには、基図から地盤高も読みとる必要がある。

(b) 社会特性に関する情報

地区別による人口や資産などは、避難場所の収容人数や、被害の程度に影響する。したがって、避難

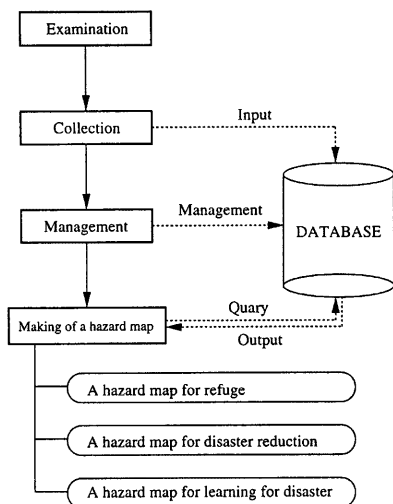


Fig. 23 Flow chart for making of a tsunami hazard map

場所の選定および被害推定のためにもこれらの情報を収集する必要がある。人口や資産などの社会特性がどのくらいの精度でわかっているかにもよるが、例えば街の区画ごとにデータを入力する。その際には、区画というポリゴン図形と人口という属性が結びつけられることになる。

(c) 津波特性に関する情報

津波の到達時間や高さなどの伝播・氾濫特性に関する情報は、津波シミュレーションによって求めることができる。

(d) 施設情報

防災関係機関、防災施設、備蓄倉庫の位置などの情報を収集する。

(e) 避難情報

地域防災計画で決められている避難場所などの避難に関する情報を収集する。また、上で収集した情報をもとにして避難場所、避難経路などの情報を求めることもできる。

(f) 被害予測情報

社会特性と津波特性を結びつけてシミュレーションすることにより、被害予測をすることができる。

4.5 情報の整理

上で収集した各種情報を手作業で整理しようとすると、膨大な時間がかかるばかりでなく、間違いを犯す可能性が高い。地図と地図上の属性を結びつけてデータベースとして保管しておいて、必要なとき

に必要な情報だけ取り出すことができれば大変好都合である。これを可能にするのが地理情報システム(GIS)である。ここでは、ベクトル型データを取り扱うGISソフトとしてESRI社のARC/INFOを使用した。主として、データベースに入力して保管してある地図の属性を整理することになる。

(g) 津波特性に関する情報

例えば、津波の最大浸水深は数値シミュレーションで用いたメッシュの各点でその値がわかっている。したがって、これをASCIIデータとして取り出せば、それをGISで読み込んで地図上の属性の1つとして取り扱うことができるようになる。具体的には、GISのTIN(Triangulated Irregular Network)の機能を使用する。まず、津波の浸水深のデータをTINで読める形のASCIIフォーマットにしておいて、それをTINに変換する。その後は、そのTINデータをもとに、TINの機能を利用してコンター図などを描くことは簡単に行える。

(h) 避難情報

避難場所の選定は、すでに情報の収集で取り上げた情報がGISに入力してあれば、機械的に決めることができる。すなわち、津波の氾濫域を除いた場所かつ距離が何メートル以内というような条件をかければ、コンピューターが最適な場所を機械的に決めてくれるのである。その後、その場所が本当に適切であるかをチェックするようにすれば避難場所を的確に決定することができる。避難経路もGISのネットワーク解析の機能を利用すれば、簡単に求めることができる。ただし、この場合も本当に避難経路として適切であるかどうかのチェックを忘れてはならない。

(h)-1 避難場所 まず、避難場所となる可能性のある候補地を取り上げてみる。ここでは、学校、公園、公民館などのホールを選んだ。これらをGISで表示すると、Fig.28のようになる。その後、数値シミュレーションで求められた津波氾濫予想区域(Fig.22)に含まれるものを取り除けば、そこは避難場所として安全な場所とすることができる。その結果を、Fig.29に示す。安全を考えると、この津波氾濫予想区域からさらに100mのバッファを取って、その区域に含まれる避難場所は除くことにすれば、Fig.30のようになる。そして、さらにこれらの中から収容人数、避難する場所からの距離などを考慮して、最終的に避難場所を決定することになる。

具体的なGISでの操作を説明すると、学校、公園、ホールのポリゴンに避難所のマークをラベリングすると、Fig.24のようになる。その後、これらのポリゴンから津波氾濫予想区域のポリゴン部分を削除す

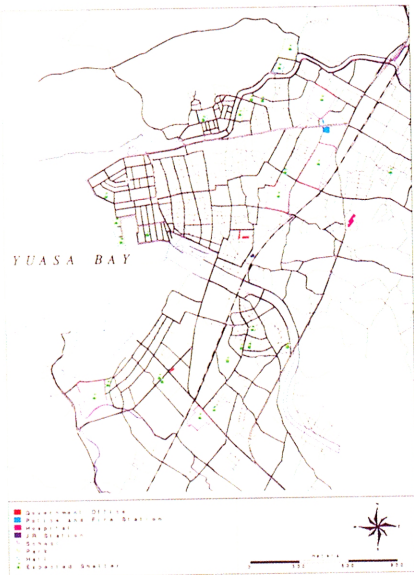


Fig. 24 Allocation of tsunami shelters

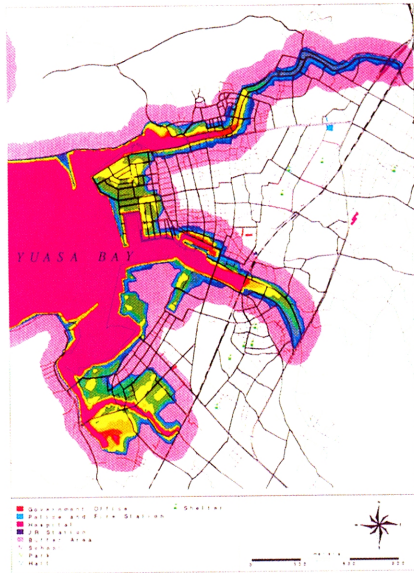


Fig. 26 Allocation of tsunami shelters with the safe zone of 100m wide around inundated area

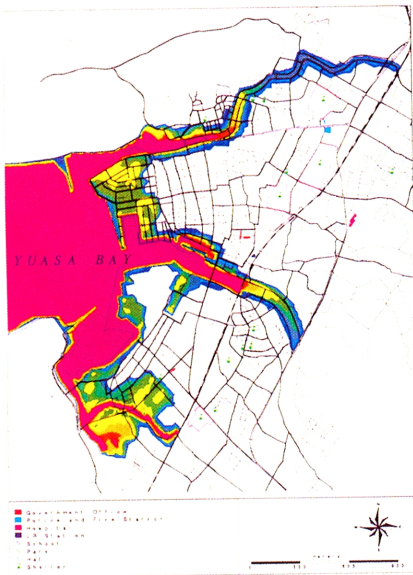


Fig. 25 Allocation of tsunami shelters in the safe zone from tsunami inundation

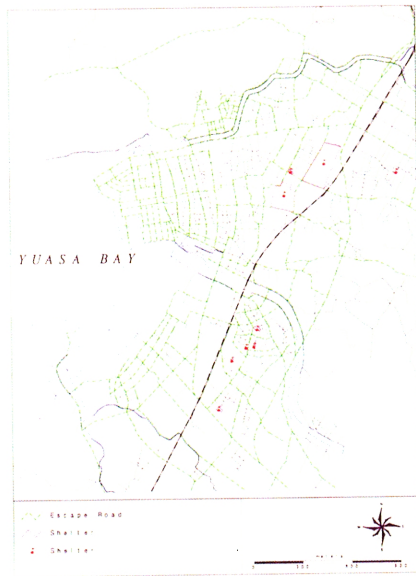


Fig. 27 Location of tsunami shelters and evacuation route network

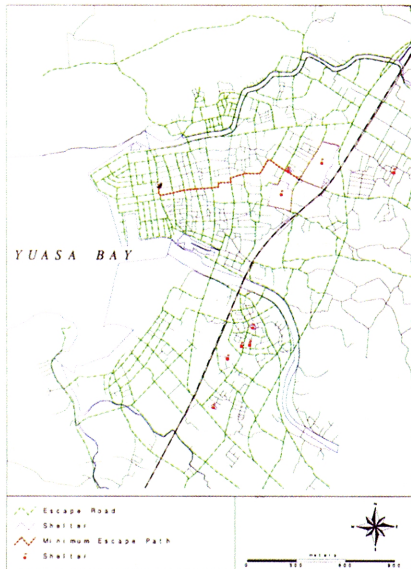


Fig. 28 Evacuation route found by minimum arrival time

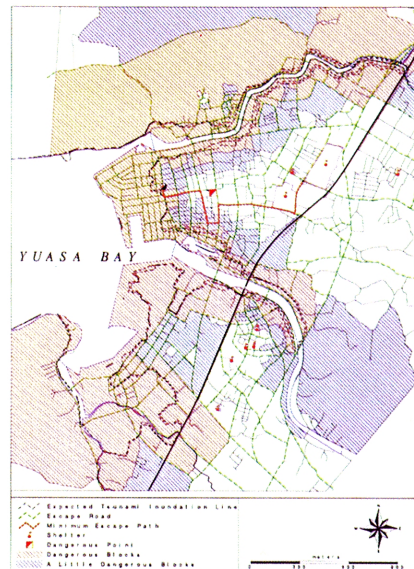


Fig. 30 Hazard map for evacuation

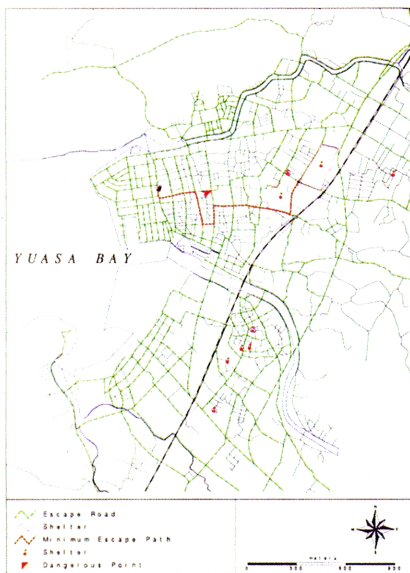


Fig. 29 Evacuation route found by minimum arrival time (some barriers are on the way)

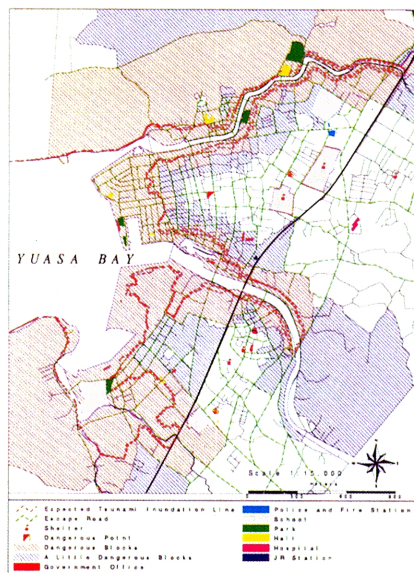


Fig. 31 Hazard map for disaster information

れば、Fig.25のようになる。同様に、津波氾濫予想区域のポリゴンにバッファをとってさらに大きなポリゴンとした部分を削除すれば、Fig.26のようになる。

(h)-2 避難経路 まず、避難路として適切な道路を選択する。ここでは、幅が5m以上の道路を避難路として選択することとするが、Fig.27のようになる。そして、例として円の右下半分が塗りつぶされている印のところ（始点）から正方形の中に点がある印のところ（終点）に避難する場合の避難経路を選択することを考えよう。すでに、避難路は緑の線で選択してあるから、あとはこの線をネットワークとみなして最短経路探索を行えばよい。それには、GISのNetworkの機能を用いる。この機能を利用して、最短経路探索した結果をFig.28に示した。赤い線が最短経路、すなわち避難経路である。しかし、この避難経路は始点付近の住民にしか当てはまらない。しかし、この始点を中心にしてたとえば半径50m以内の住民に関してはこれと同じ避難経路を指定することにすれば、避難経路探索のケースもそれほど多くはならなくてすむ。住民には細かい情報を提供する方が、住民も納得して行動することができると考えられる。GISを利用すれば、このようなきめの細かい情報を比較的簡単に提供することができるのである。

もう1つ、避難経路の途中に危険箇所がある場合を考えてみよう。Fig.29において、赤の正方形に上半分の三角形が塗りつぶされている印が危険箇所である。すると、ここを通る避難路は利用することはできない。そこで、ここの道路の属性を通行不可能としておく。その後、通行可能な避難路を選択してから、再び最短経路探索を行って避難経路を決定すると、Fig.29の赤い線のようになる。

4.6 津波ハザードマップの作成

さて、いよいよ、これまでに収集および整理した情報をもとに津波ハザードマップを作成する。すでに、ハザードマップ作成に必要な情報はGISのデータベースに保管してあるので、あとは活用目的に応じて必要な情報を取り出してそれをGISの地図上に表示すればよい。

(1) 避難活用型ハザードマップ

避難活用型ハザードマップにおいては、実際の災害時に活用するということを念頭に置いておかなければならない。必要な情報としては、避難場所、避難区域、避難経路、津波氾濫予想区域はもちろんのこと、最短津波到達時間や警報伝達経路、さらには避難基準・時期、自主避難の必要性などを記載する必要がある。

情報の整理で加工しておいた避難情報をデータベースから取り出してFig.30のような図をGISで作成すれば、避難活用型ハザードマップができあがる。

(2) 防災情報型ハザードマップ

防災情報型ハザードマップは、避難した後に必要となる情報をできるだけ詳しく記載するのがよいと考えられる。したがって、記載する情報としては、津波氾濫予想区域のほか、避難場所、行政・警察・消防などの防災関係機関、防災施設、病院などの医療機関、食糧備蓄場所などいろいろな情報が考えられる。防災情報型ハザードマップをFig.31に示す。

4.7 ハザードマップ作成上の問題点

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、情報の管理がしやすく、その情報を用いてさまざまな情報が機械的に決定できることがわかった。しかし、その反面、実際の状況に照らし合わせて考えていないので、その決定がまったく無意味な場合も考えられる。したがって、GISを利用したハザードマップでは、人間による最終的なチェックを怠ってはならないだろう。災害で被災するのは人間であるから、常に被災者の立場で考えるというのは、よく言われることである。今後の課題としては、人間的な影響を、すなわち社会科学的な要素を、GISによるハザードマップ作成にどのように取り込んでいくかであろう。また、ハザードマップ作成のおおもとになっているのは、災害の数値シミュレーション結果や被害実績である。とくに、数値シミュレーション結果に基づいてハザードマップを作成する場合には、その信頼性が問題になる。計算結果が過大評価であると、避難場所までの距離が遠くなり、住民の避難行動を妨げる可能性がある。一方、過小評価した場合には、大惨事になりかねない。したがって、シミュレーション結果の信頼性の問題を、今後議論の必要があろう。

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。メッシュ数が多くなり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結論することができる。

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にインプット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ことがわかった。

最後に、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提供していただいた。ここに記して、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.
- 岡 太郎(1992): ガラーキン・反復型有限要素法による洪水氾濫解析, 水工学論文集, 第36巻, pp.331-336.
- 河田恵昭・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.
- 川原陸人・竹内則雄・首藤伸夫(1976): 2段階ラックス・ウェンドロフ有限要素法による潮汐解析, 海岸工学論文集, 第23巻, pp.498-501.
- 建設省河川局治水課(1994): 洪水ハザードマップ作成要領及び解説書.
- 土木学会水理委員会(1985): 水理公式集—昭和60年版—, 土木学会.
- 中川 一・高橋 保(1985): 堤防の決壊による市街地の洪水氾濫に関する研究, 第40回土木学会年次学術講演会講演概要集第2部, pp.441-460.
- 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.

On a Hazard Map of Tsunami Flooding

Yoshiaki KAWATA and Nobuaki KOIKE*

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

A tsunami hazard map has to be proposed to reduce human damage in accompany with tsunami flooding. The characteristics of the Nankaido earthquake tsunami propagation and inundation such as arrival time and inundated depth are estimated by a numerical simulation model with finite element method which is very accurate in the complex shape of coastal area with harbor and reclaimed area. These results are combined with various information on evacuation expressed by Geographic Information System, then an integrated tsunami hazard map proposed to prepare safer evacuation for residents.

Keywords : evacuation, hazard map, tsunami disaster, FEM, GIS