

津波解析支援GISによる津波防災情報図の作成

細萱泉：海洋調査課，山内明彦：測量船天洋

渡辺一樹：技術・国際課，加藤幸弘：環境調査課，長屋好治：企画課

矢沼隆：(株) パスコ

Creation of The Tsunami Information Map with The Tsunami GIS Software

Izumi HOSOGAYA：Hydrographic Surveys Division

Akihiko YAMAUCHI：Survey Vessel TENYO

Kazuki WATANABE：Technology Planning and International Affairs Division

Yukihiro KATOU：Environmental and Oceanographic Research Division

Yoshiharu NAGAYA：Administration and Planning Division

Takashi YANUMA：PASCO Corporation

1 はじめに

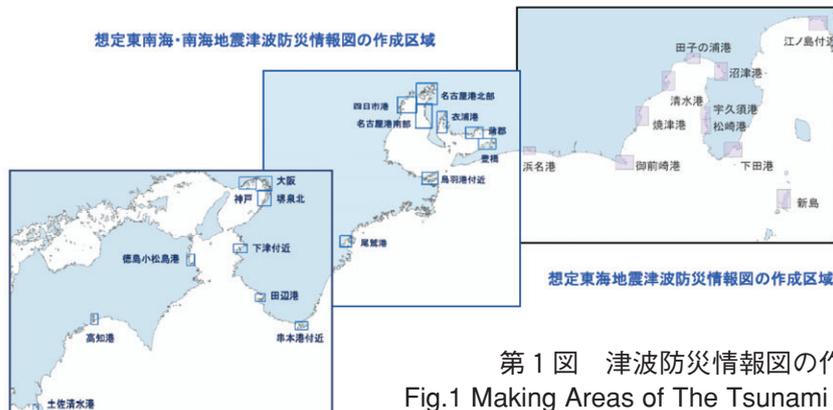
平成7年の阪神淡路大震災を機に地震に対する防災意識がなお一層高まるなか、(財)日本水路協会を中心に「港湾域における津波の挙動の調査研究」が始まった。

ここで培われた津波の数値シミュレーション手法と整備されつつある水深データベースによって、海

洋情報部では平成13年度に宮城県沖の津波防災情報図の試作図を作成した。引き続き平成14年度及び15年度に、中央防災会議の定める想定東海地震及び想定東南海・南海地震を波源とした津波の数値計算を行い、検討委員会の中で、津波の研究者からも助言を受けて、津波防災情報図を作成した。想定東海地震、想定東南海・南海地震津波防災情報図は、平成16年11月に広報され、海洋情報部のホームページに

第1表 津波防災情報図の作成区域 Table 1 Making Areas of The Tsunami Information Map

想定地震	対象区域
想定東海地震	江ノ島付近，新島，下田港，松崎港，宇久須港，沼津港，田子の浦港，清水港，焼津港，御前崎港，浜名港
想定東南海・南海地震	豊橋，蒲郡，衣浦港，名古屋港南部，名古屋港北部，四日市港，鳥羽港付近，尾鷲港，串本港付近，田辺港，下津付近，堺泉北，大阪，神戸，徳島小松島港，高知港，土佐清水港



第1図 津波防災情報図の作成区域 Fig.1 Making Areas of The Tsunami Information Map

においても公開している。

(<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAIYO/tsunami/index.html>)

津波防災情報図を作成するにあたって、一連の作業を（株）パスコ製の津波解析支援GISのソフトを用いて行なった。地形データ及び計算結果はGISデータとして整備しており、解析処理結果の有効な活用が可能であることが大きな特徴である。

本稿では、津波防災情報図の作成過程を述べる。

2 作成対象区域及びメッシュサイズ

津波防災情報図を作成した区域を第1表及び第1図に示す。

津波防災情報図は、津波の数値シミュレーション結果に基づいて作成されているが、数値計算を行うために、メッシュ化した水深・標高データを作成した。

メッシュデータについては、外洋域から港湾域にかけて1次メッシュ区分から5次メッシュ区分まで、計算容量と地形の再現精度を考慮して、外洋域で粗く、港湾域に近づくにつれて細かくしている。設定に当たっての考え方は以下のとおりである。

2.1 外洋域のメッシュデータ

想定地震の震源を含む範囲の水深メッシュデータを1次～3次メッシュ区分で作成する。

4次メッシュ区分については、4次領域のみでの津波計算にも使用できるように、水深及び標高メッシュデータを作成する。

2.2 港湾域のメッシュデータ

対象港湾等を含む範囲について、水深メッシュデータ及び標高メッシュデータを5次メッシュ区分

で作成する。メッシュ区分毎のメッシュサイズを第2表に示す。

3 地形データの作成

設定した各領域について、地形メッシュデータを作成した。

海域についてはJ-Egg500 (JODC-Expert Grid data for Geography-500m) データ、特に5次領域については、測量原図や海図などから海底地形等深線図を作成してデジタル化した。

陸域の4次領域については、国土地理院数値地図50mメッシュ(標高)データを用い、5次領域については都市計画基本図の標高点をデジタイズして用いた。

また港の防波堤及び線状の構造物(防潮堤、岸壁等)についてはメッシュでは表現出来ないため、メッシュの格子間を通る折れ線として位置を表し、地盤高を属性としてデータ化した。

データを作成するにあたり、日本測地系のデータについてはWGS84への変換を行い、高さの基準は最低水面(LW)に揃えた。

このようにして取得したデータをランベルト正角円錐図法に投影し、各メッシュの水深をTIN法(Triangulated Irregular Network)により補間して求めた。

なお、特に5次領域については海図、都市計画基本図、測量原図等と補間後のメッシュデータの比較をし、水深・標高値の修正を行った。

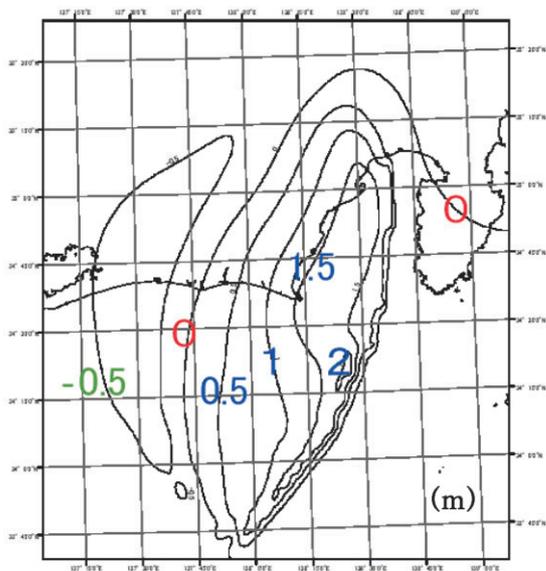
4 想定震源の設定

ここでは想定震源として、「東海地震に関する専門調査会」、「東南海・南海地震に関する専門調査会」(中央防災会議)で定められた断層モデルを用いて、津波の数値計算を行った。

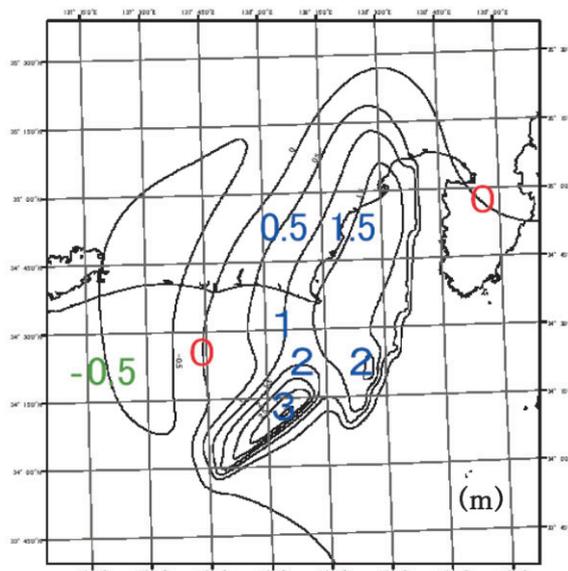
想定東海地震については、想定震源域に加え、付加断層としてA, B, C, Dの4つが提示されており、津波防災情報図の作成において、対象となる5次領域に対して、最大の水位上昇をもたらす断層として、浜名港では想定震源域+付加断層ABD、浜名港以外では想定震源域+付加断層ABCを用いた。

第2表 メッシュ区分毎のメッシュサイズ
Table 2 Size of each Meshes

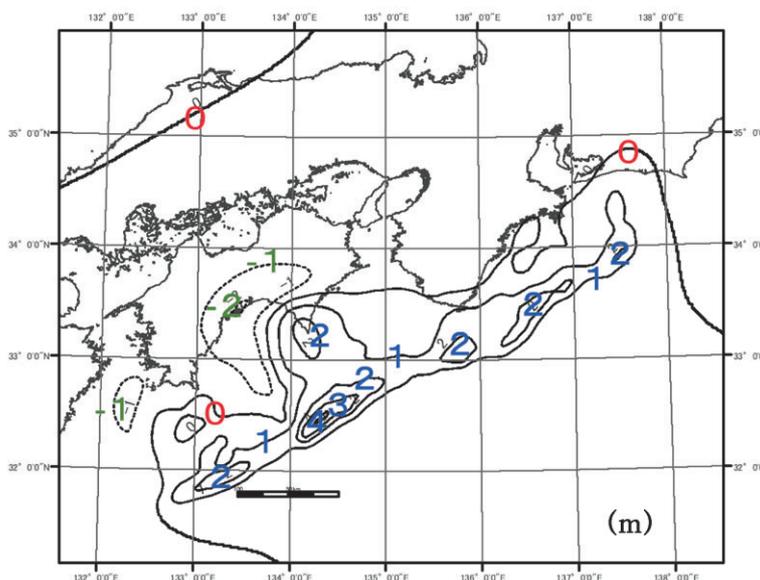
メッシュ区分	メッシュの大きさ
1次	4,050m
2次	1,350m
3次	450m
4次	150m
5次	50m



第2図 地盤変位分布 (想定東海地震+付加断層A, B, C)
fig. 2 Distribution Diastrophism (Assumed TOKAI Earthquake+Addition Dislocation A, B, C)



第3図 地盤変位分布 (想定東海地震+付加断層A, B, D)
fig. 3 Distribution Diastrophism (Assumed TOKAI Earthquake+Addition Dislocation A, B, D)



第4図 地盤変位分布 (想定東南海・南海地震)
fig. 4 Distribution Diastrophism (Assumed TONANKAI・NANKAI Earthquake)

また想定東南海・南海地震については、東南海地震と南海地震が同時に発生したとしている。

想定東海地震及び想定東南海・南海地震による地盤変位分布を第2～4図に示す。

5 シミュレーションの実施

設定した断層モデルから弾性論によって海底の地

盤変位量を求めたものを波源モデルとして与え、浅水理論に基づく運動方程式及び連続の式を差分化したものを解くことによって、津波の計算を行った。なお、想定地震による津波の計算に先立って、過去に発生した津波を再現し、再現性の検証を行っている。

鉛直方向の積分流量M, Nを以下の様に定義する。

$$M = \int_{-\zeta}^{h-\eta} u dz \quad N = \int_{-\zeta}^{h-\eta} v dz$$

この積分流量M, Nを用い, 断層による地盤変動を考慮し, 非回転, 長波近似, 非粘性を考慮すると基本方程式は次式のように表される.

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} &= -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{\frac{1}{3}}} \frac{M\sqrt{M^2+N^2}}{D^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{\frac{1}{3}}} \frac{N\sqrt{M^2+N^2}}{D^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} &= - \left(\frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \right) + \frac{\partial \eta}{\partial t} \end{aligned}$$

但し, u, v : x, y 方向の流速成分

M, N : x, y 方向の流量を海面から海底まで鉛直方向に積分した質量輸送の成分

ζ : 平均海面からの水位変化

n : マニングの粗度係数

$\frac{gn^2}{D^{\frac{1}{3}}}$: 海底摩擦係数の式: 海底摩擦係数
(5 m以深は0.005, 以浅は0.01)

D : 水深, $D = h + \zeta - \eta$

h : 平均海面からの初期水深

g : 重力 加速度 (9.8m/sec²)

η : 地盤変動量

海岸が低く, 水が陸上に溢れる場合, 浸水の先端での条件は次式で表す.

$$M = C_0 H \sqrt{gH} \quad N = C_0 H \sqrt{gH}$$

但し, C_0 : 流量係数 (定数0.5)

H : 地盤からの水位

防波堤については, 水位がその天端高を越えた場合, 次式で流量を計算する.

$$M = \begin{cases} Ch_1 \sqrt{2gh_1} & h_2 \leq \frac{2}{3} h_1 \\ C'h_1 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} & h_2 > \frac{2}{3} h_1 \end{cases}$$

$$N = \begin{cases} Ch_1 \sqrt{2gh_1} & h_2 \leq \frac{2}{3} h_1 \\ C'h_1 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} & h_2 > \frac{2}{3} h_1 \end{cases}$$

但し,

h_1 : 天端高を基準とした堤の前の水深

h_2 : 天端高を基準とした堤の後の水深

C : 流量係数 (0.35)

C' : 流量係数 (2.6×C)

である.

計算にあたっては, 計算領域を限定する必要があるため, 外海に境界が生ずる. 外海の境界は開境界とし, 津波は境界で反射せずに, 進行波として通過するものとする.

$$\sqrt{M^2 + N^2} = \zeta \sqrt{gh}$$

6 津波防災情報図, 津波アニメーション及びデータベースの作成

想定地震によるシミュレーション結果をGISデータとして作成し, GIS (ESRI社製のArc Map) 上で津波防災情報図を作成した.

なお, 津波防災情報図は紙出力図と共にPDFでも作成した. 同時に, 時系列図として津波の来襲を表すGIF形式の津波アニメーションを, 同様にGISを用いて作成した.

以下, 津波防災情報図及び津波アニメーションに掲げるデータの処理方法及びGISデータベースの検討結果を述べる.

6.1 津波防災情報図に掲げる項目

津波防災情報図は, 各海域において「進入図」及び「引潮図」の2種類を作成した. 「進入図」は計算初期水位が最高水面時の計算結果, 「引潮図」は最低水面時の計算結果を掲げることとした.

各図に掲げた項目の一覧を以下に示す.

第3表, 第4表から第1波到達時間及び最大流速は, 以下に述べる考え方によって作成した.

第3表 進入図に掲げた項目の一覧
Table 3 List of Indicated Tsunami Inflow Map

項目	表現形態
最大水位上昇	50cm 毎の色分け
到達時間	等時線
進入時最大流速	長さを流速に比例させた矢符
経時変化図	代表4地点での水位変化グラフ

第4表 引潮図に掲げた項目の一覧
Table 4 List of Indicated Tsunami Outflow Map

項目	表現形態
最大水位低下	50cm 毎の色分け
露出域	海底が露出する範囲の色塗り
引潮時最大流速	長さを流速に比例させた矢符
経時変化図	代表4地点での水位変化グラフ

6.1.1 第1波到達時間

計算開始時から、最初に+10cm水位が上昇した時間を求めた。なお図に表示する海域が震源域内にあり、地震発生と共に地盤変動を伴う場合については、地震発生時の水位変動が複雑になるため、到達時間については描かないこととした。

6.1.2 最大流速

進入時及び引潮時の最大流速は、最初は対象とする海域に向かう方向を押波方向、反対方向を引波方向と定義して、例えば押波方向から±90°の範囲での最大流速を進入時最大流速と定義していたが、結果が必ずしも岸線に沿った方向にならず、最大流速の発生が異なった時刻になることにより、隣り合う場所でも最大流の方向が食い違ったものとなり、不具合が生じることが分かった。

そこで、陸岸からの反射波の影響を受けない、第1波による流速の方向を押波（もしくは引波）方向と定める方式を採用し、以下に述べる手順で最大流速を求めた。

6.1.2.1 水位の変動から押波期間及び引波期間をメッシュ毎に決定

10cmを超える継続した水位上昇が起きた時刻から1回目の押波期間が開始されるとする。同様に10cmを超える継続した水位下降が起きた時刻から1回目の引波期間が開始されるとする。

このように、計算時間内で複数回の引波期間、押波期間を特定する。

6.1.2.2 押波または引波の第1波期間から主流向の決定

計算出力結果より、計算開始後に初めて現れる押波または引波の第1波期間の中で、流速のベクトル合成を行い、そのベクトル合成結果から第1波期間

の主たる流向を求める。

6.1.2.3 押波時及び引波時の最大流速ベクトルの決定

第1波期間が押波期間であれば、全計算時間の各押波期間での流速ベクトルのうち、ステップ2で求めた流向成分をもつ流速ベクトルを抽出し、その中から流速が最大のものを、押波時の最大流速ベクトルとして決定する。次に、全計算時間の各引波期間での流速ベクトルのうち、ステップ2で求めた流向と180度反対の流向成分をもつ流速ベクトルを抽出し、その中から流速が最大のものを、引波時の最大流速ベクトルとして決定する。

第1波期間が引波期間であれば、これに対応するように引波時の最大流速ベクトルと押波時の最大流速ベクトルを決定する。

6.1.2.4 9個(150m)のメッシュから表示する最大流速ベクトルの決定

津波防災情報図では、50mメッシュでの流速ベクトルの表示は煩雑になるため、3×3の9個のメッシュの中で最も大きい、押波時及び引波時の最大流速ベクトルを選択し、これをその9個(150m)のメッシュの代表する最大流速ベクトルとして表示する。

津波防災情報図の例として、尾鷲港の進入図を第5図に示す。

6.2 津波アニメーションに掲げる項目

津波アニメーションには、水位の変動を50cm単位での色分け表示で表し、流速の向き及び大きさを矢符で表示した。さらに、露出域を色塗り表示した。

6.3 データベースの作成

以上の作成手法により、津波防災情報図及び津波アニメーションに掲げる情報及びその他の情報について、データベースの定義を考察し、データベースを作成した。

データベースは、よく流通されているものとしてD-BASE IV形式で座標点及び属性を管理することとした。

データベース一覧を第5表に示す。

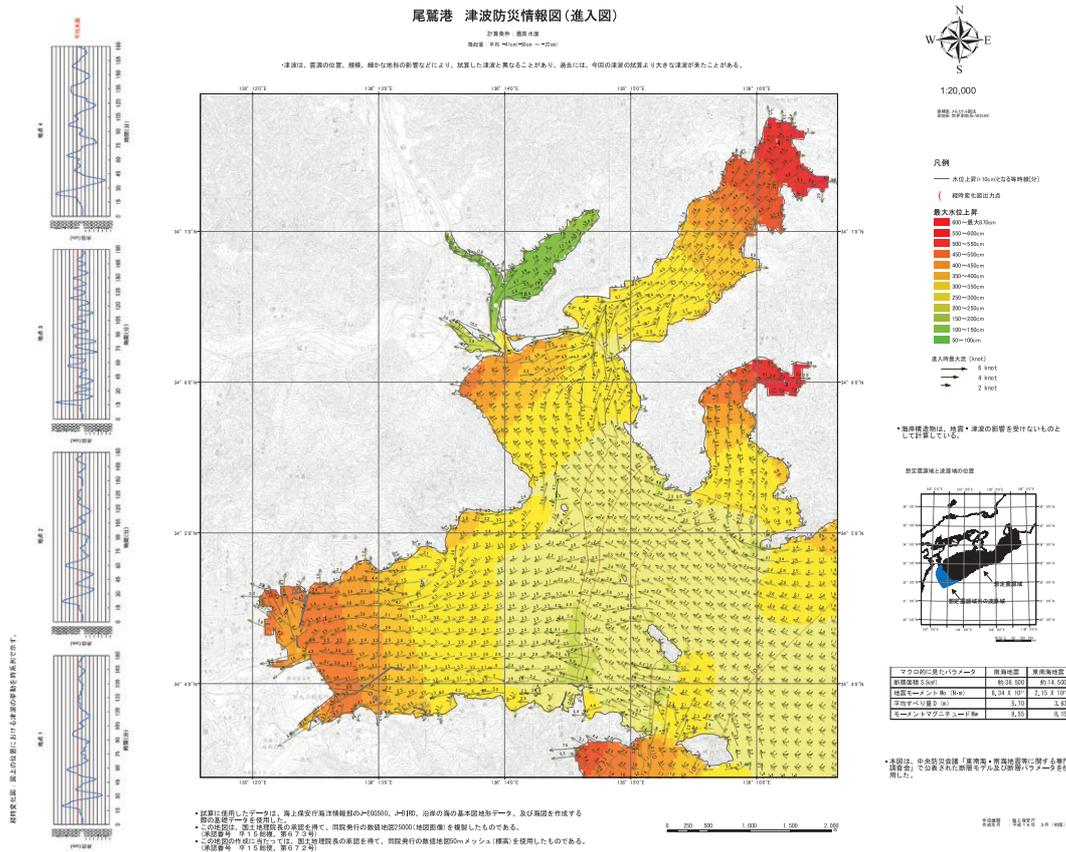
7 津波解析支援GISシステム

6に述べたデータベースの管理, 更新を含め, 津波解析支援GISシステムを構築した.

同システムはESRI社製のGISソフトウェアであるArcView 8をカスタマイズすることにより, 開発作

成された株式会社パスコのソフトウェアである.

津波解析支援GISシステムは3つのサブシステムからなり, 各サブシステムの機能は第6表に示す通りである. これらの機能のうち, 断層パラメータ, 地形データ, 計算結果については, 所定のフォーマットで作成されたデータであればシステムにイン



第5図 津波防災情報図の表示例(尾鷲港進入図)

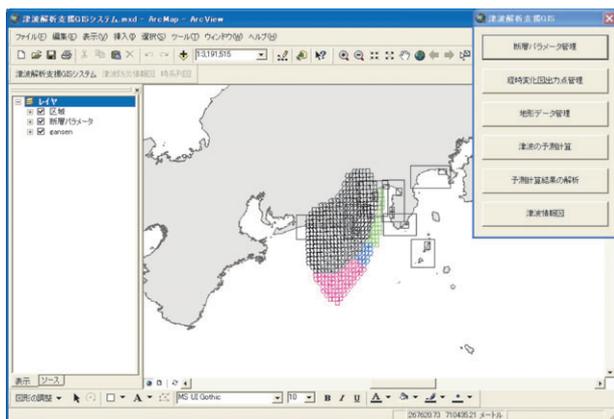
Fig. 5 Case of Tsunami Information Map (OWASE KO Inflow Map)

第5表 データベースの一覧
Table 5 List of Data Base

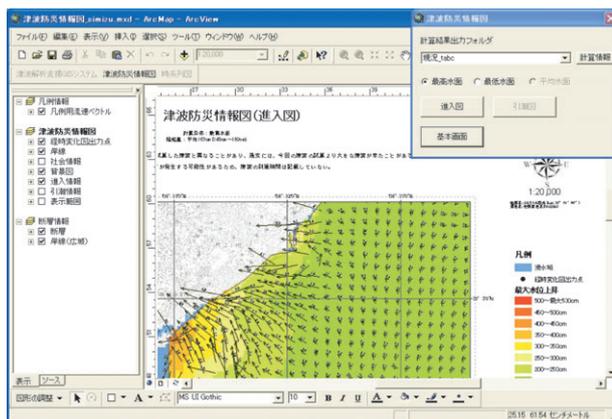
データ種類	内容
地形ソースデータ	地形メッシュデータの元となったデータ
地形メッシュデータ	地形のメッシュデータ
格子データ	防波堤等の線状の構造物をメッシュの格子間を通る折れ線として位置を表示したもの
断層モデル	断層パラメータ
水位変動	各メッシュでの最大水位上昇, 最大水位低下等
流速・流向	各メッシュでの進入時及び引潮時最大流速等
到達時間	各メッシュでの津波到達時間
時系列	0.2分間隔での水位及び流速
経時変化	代表地点での水位及び流速値

第6表 津波解析支援GISシステムの内容
Table 6 Contents of Tsunami GIS Software

サブシステム名	機能
津波解析支援GISシステム	断層パラメータ管理
	経時変化図出力点管理
	地形データ管理
	シミュレーション実行
津波防災情報図表示	シミュレーション結果の解析
	津波防災情報図の作成
時系列図表示	地震発生からの任意の時間のスナップショットの表示及びイメージファイルへの出力



津波解析支援GISシステム
Tsunami GIS Software System



津波防災情報図表示例
Case of Indicated Tsunami Information Map

ポートが出来るようになっている。

各サブシステムの表示例を第6図に示す。

8 おわりに

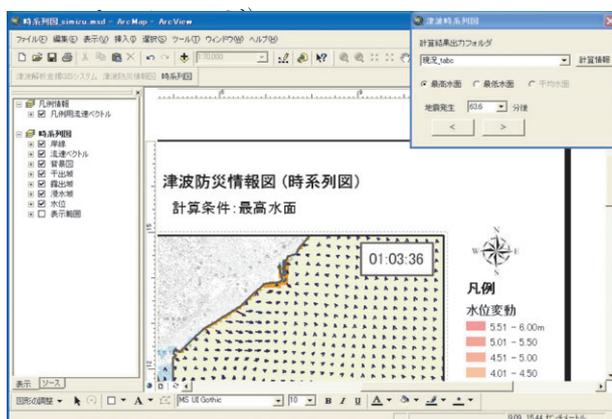
想定東海地震及び想定東南海・南海地震を対象に、全28海域で津波防災情報図を作成することができた。

これらの図の作成に用いた解析結果はデータベース化されており、津波解析支援GISシステムで管理することができる一方、データ自身についても流通が可能であり、今後は他のGIS情報と併せた解析が可能である。

最後に、津波防災情報図の作成にご尽力を賜った多くの関係者に感謝致します。

参考文献

相田 勇：「南海道沖の津波の数値実験」地震研究所彙報，54，pp329-341，(1981)。
海上保安庁海洋情報部：「平均水面，最高水面及び最低水面一覧表（2004）」。
海上保安庁水路部：「南海大地震報告 津浪編，（1948）」水路要報増刊号，昭和21年。
財団法人日本水路協会：「港湾域における津波の挙動の調査研究その1～その3」平成9～11年。
財団法人沿岸開発技術研究センター：「津波・高潮ハザードマップマニュアル（2004）」。
中央防災会議：東海地震に関する専門調査委員会に関する専門調査会配付資料（中央防災会議



時系列図表示例
Case of Indicated Tsunami Shot