

## 徳島県浅川に遡上した津波の挙動に関する数値実験

相田 勇\*・日比谷 紀之\*\*

### 1. はじめに

紀伊半島西岸や四国南岸に大きな被害をもたらした1946年南海地震津波は、徳島県海部郡にも著しい被害を与えた。その中で最も多数の死者を生じた海南町浅川においては、既に村上ほか(1985)が自動レベルを用いた測量によって、浸水高の分布を調べ津波の挙動を詳細に明らかにしている。また町内には、1854年安政南海津波と1946年南海津波の高さの差を明確に示す石碑も実在している。そこで本稿では、この浅川において1854年および1946年両南海地震の断層モデルに基づいた数値実験を行い、その結果をこれらの実測結果と比較することによって、津波遡上の挙動を明らかにすることを試みる。

数値計算の方法としては、筆者の一人(相田, 1977)が高知県須崎および新宇佐において、陸上に遡上する南海津波の挙動を数値実験で再現できることを確かめたものがある。この方法は、相田・羽鳥(1983)によって南海地震の断層モデルに基づいた数値実験に用いられ、和歌山県湯浅・広川両町における津波遡上の挙動を明らかにした。

一方、1946年南海地震の断層モデルは、Kanamori(1972)によって地震学的に議論されたが、余震域を断層面の大きさとする、地殻変動を説明するにはあまりにも小さいことが指摘されている。またAndo(1975, 1982)は地震学的なデータの他に、津波に関

するデータを用いることによりこの地震の断層モデルを求めている。筆者の一人(相田, 1981)は関東から九州に至る広範な領域を対象として南海地震に伴う津波の数値実験を行い、各地の検潮記録に最もよく合致する計算波形を与える最適断層モデルを求めた。実際にこの断層モデルに基づいて行った和歌山県湯浅、広川町での津波遡上数値実験では、両町内での測量から得られた津波の浸水高の分布がきわめてよく再現された(相田・羽鳥, 1983)。したがって、本研究では、1854年および1946年両南海津波の波源として、相田(1981)による断層モデルを用いることにする。

### 2. 数値実験の方法

浅海波方程式に、断層運動によって生じる海底鉛直変位 $\xi$ を考慮すると、水平方向の運動方程式および連続の式は、

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} = -g D \frac{\partial \xi}{\partial x} - f_c \frac{q_x Q}{D^2} - \left( \frac{q_x}{D} \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{q_y}{D} \frac{\partial q_x}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} = -g D \frac{\partial \xi}{\partial y} - f_c \frac{q_y Q}{D^2} - \left( \frac{q_x}{D} \frac{\partial q_y}{\partial x} + \frac{q_y}{D} \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (3)$$

\*東京電機大学工学部・(財)地震予知総合研究振興会

\*\*東京大学地震研究所

とあらわされる。ここに  $q_x$ ,  $q_y$  は深さ方向に積分した流量の  $x$ ,  $y$  成分,  $h$  は水深,  $\zeta$  は静水面からの水位,  $\xi$  は海底の鉛直変位であり,  $D = h + \zeta - \xi$ ,  $f$  は海底における摩擦係数,  $Q = \sqrt{q_x^2 + q_y^2}$  である。なお遡上計算を含む領域以外では, 水深が大きいことから(1), (2)式の右辺第2項, 第3項を省略した。

計算領域としては, 御前崎から九州に至る広範な領域をとり, これを間隔5kmの正方形の計算格子81×142個に分割した。さらに徳島県海部郡海南町付近を含む35km×40kmの沿岸域では計算格子を1/2づつ逐次細かくとった。その様子を図-1に示す。図中M1, M2, ……………M6はそれぞれ格子間隔2.5km, 1.25km, ……………78.125mの領域を示す。また浅川港付近の遡上計算領域では計算格子の間隔をM6の1/4, 19.53mにとってある。その範囲の詳細を図-2に示す。図の周囲に示す数字は, 計算格子番号で, I軸方向に105格子, J軸方向に133格子あてられている。水深は水路部発行の5万分の1「沿岸の海の基本図」から読みとり, T.P.基準にして示した。また陸上部は海南町役場から提供頂いた5,000分の1「海南・海部町地形図」(徳島県)と, 村上ほか(1985)の測量によって得られた資料を参照して地盤高の等値線を描いた。浦上川両岸に集中している浅川の集落を, 図-2に斜線をつけて示す。この部分については, 津波の運動エネルギー損失を与える等価摩擦係数  $f$  として0.5を与えた。その他の陸上部および5m以浅の海域については  $f_s = 0.01$ , また5m以深の海域は一律に  $f_s = 0.005$  を与えた。計算時間間隔  $\Delta t$  は0.01分とした。

なおこの領域の南岸入り口付近に海老ヶ池への開口部があるが, 計算領域の大きさの都合で省略した。その影響はさほど大きくないと思われる。

遡上部では, まず各地点での水位と地盤高を比較して, その地点が浸水しているか否か

を調べる。浸水域では通常の海域と同様な計算が行われるが, 浸水域と非浸水域の境界では,  $q_x$  あるいは  $q_y = C \cdot H \sqrt{gH}$  の関係を用いて流量の計算を行う(詳細は相田, 1977を参照)。但し,  $H$  は地盤上の浸水高であり, 係数  $C$  は0.5と仮定する。津波の波源としては, 相田(1981)によって求められたModel 19'(1946年南海津波)およびModel 20'(1854年安政東海津波)を用いた。

### 3. 1946年津波と1854年津波

浅川にある観音堂の石段脇には, 1946年津波と1854年津波の来襲地点を示す石の角柱が建てられているので, 両津波の高さが明確に比較できる。この標識のある地点は, 村上ほか(1985)の測量によれば, 1854年津波がT.P.上6.41m, 1946年津波が4.13mである。この位置は図-2に黒丸でBとして示してある。

Model 20'およびModel 19'を用いて数値実験を行ってみると, 1854年および1946年津波のこの位置での計算値は, それぞれ5.7m, 4.7mとなり, 1854年津波に対して小さく, 1946年津波に対してやや大きい結果となった。そこで試みにModel 20'の断層すべり量を0.73倍して計算を行ってみると, B地点での浸水水位は4.3mとなり1946年の実測値にかなり近い値となった。1946年津波に対する, Model 19'とModel 20'×0.73の2つの結果を比べると, 断層すべり量はほとんど同じであるが, 浅川前面の断層面の位置がやや異なっているため, 津波の周期が異なり, そのため最高水位となる2波目の水位に差が生じているようである。ここでは, より実際に近い浸水高を与える後者を1946年津波のモデルとする。

こうして計算された1946年および1854年の両南海津波の浅川における水位分布をそれぞれ図-3および図-4に示す。これらの図において, 太い屈曲した実線は海岸線および河

岸を示し、細い屈曲線は浸水域をあらわす。また細い曲線は、計算された津波の静水位からの最高水位の等高線（単位；m）を示したものである。まず、図-3に示す1946年南海津波の最高水位分布をみると、加島より内側の浅川湾内では、湾口近傍に4.5m程度の部分がわずかにあるほかは、全体としてはほぼ5m程度の高さで、その空間的变化は非常に小さい。しかし陸上部についてみると、北岸の伊勢田川や粟ノ浦付近では、海岸から内陸部にいくにしたがい、5.5m程度から6~6.5mまで増加していたり、また逆に湾奥浅川付近では海岸で5m程度だったのが、内陸部で4.1mにまで減少しているなど、津波の最高水位の空間的变化は大きくなる。浅川付近については、さらに後述する。

一方、図-4に示す1854年安政南海津波の場合は、浅川湾の湾口付近から湾奥にいくにしたがって、津波の最高水位が5m程度から6.5m程度にまで増加していくのが特徴的である。これは計算波形からみると（図-7に1946年津波のみを示す）、1946年津波が第2波目が高く、第3波目は低くなっているのに対して、1854年津波は第3波目の方が更に大きくなっていることによるようである。

また、陸上部について1946年津波と比較してみると、粟ノ浦海岸付近で約1.0m、伊勢田川流域では2.5m以上、1854年津波の方が高くなっている。実際には前述の観音堂の石段（B地点）で両南海津波の高さの差は約2.3mであるから、この数値実験で仮定した1854年南海津波の断層すべり量は小さ過ぎることになる。しかし1854年安政南海津波については、明確な浸水高が得られている場所がきわめて少なく、村上ほか（1985）も海岸付近の津波高さと同じ等高線まで浸水するとして浸水域を求めている。この数値実験では、その浸水域にはほぼ合致する結果が得られているが、陸上の標高データが不確かなことから、1854年津波についてのこれ以上の議論は困難と思われる。

#### 4. 1946年南海津波の挙動

##### a) 浸水高の空間分布

村上ほか（1985）は、浦上川河口両岸に集中している浅川の集落付近における浸水高を、浸水痕跡、住民の証言などに基づいて詳細に調査した。図-5（a）にそれから転写したT.P.上の津波浸水高の等高線（単位；m）を示す。これに対して図-5（b）に今回の数値実験によって得られた浸水高の等値線を示す。図中、二重丸で示したA地点は漁村センター前で、現在「南海地震津波最高潮位、T.P.上525cm」と刻まれた石柱の標識が建っている場所である。また同じく二重丸で示したB地点は、既に述べた観音堂石段脇の角柱の建っている場所で、ここでの津波の高さは4.13mと測られている。一方、数値実験の結果は、A、B両地点でそれぞれ5.3m、4.3mであるから、これら特定の2地点では実測値と計算値が非常によい一致を示している。

しかしながら、実測値の方は津波が海岸から内陸部に進行するに伴い、200m程度の距離で2m以上も水位が低下しているが、数値実験の方では表現しきれていない。図-5（c）に家屋密集域（斜線で影をつけた部分）を地盤高の分布図に重ねて示す。この家屋密集域では尾鷲市街における津波遡上の数値実験（相田・羽鳥、1982）で使用した $f_s = 0.5$ の等価摩擦係数を考えたが、この領域での津波エネルギーの減衰が実際にはもっと大きかったのかもしれない。

もう一つ考えられる理由は、後背地の地盤の高さの問題があげられる。津波の浸水高の実測域では、地盤の標高が詳細に測られているが（村上ほか、1985）、その後背地の地盤高については正確に測られていない。本研究では浸水域の分布から推定して、低地がそのまままで続いているものと考えたが、その勾配が緩やかすぎると浸水した一波目の津波の排水が悪くなり、水位が高くなる可能性があ

る(図-7, ST-26の波形参照)。

浦上川は、津波の遡上や建物被害に強い影響を与えているが、浸水高の等高線が河口部分で湾曲しており、その傾向は実測とモデル計算とでよく一致していることがわかる。なお、図-5(b)にST-20など番号を付した黒丸は、後に浸水水位波形を示す地点の位置である(図-7)。

#### b) 流向および水位波形

図-6(a), (b), (c), (d)はそれぞれ地震後45分, 47分, 49分, 51分経過した時点での伊勢田川および浦上川流域における津波の流速分布を示す。これらの時刻は図-7の横軸に, a, b, c, dと示した時刻に相当している。また、これら水位波形を示した地点の位置は、図-8(b)に黒丸に番号を付けて示してある。

まず(a)の時点では、粟ノ浦および伊勢田川への津波の侵入が始まっているが、下方の浦上川河口では1波目の戻り流れと2波目の流入とが衝突している。(b)の時点になると伊勢田川流域ではかなり奥まで流れ込み、また浦上川では河口からの流入が激しくなっており、その流速も3 m/secから5 m/secに達している。また町の北側の海岸からの直接の流入も勢を増している。(c)の時点になると、伊勢田川、浦上川両流域とも海岸より内陸に流れの主力が移っており、浸水面積が広がっている。海岸では浅川港内で、反時計まわりの流れが生じている。(d)では、この反時計まわりの流れが一層強まっているのがみられる。また、この時点で伊勢田川流域は戻り流れに転じている。浦上川流域は、先端部は依然浸水面積が拡大する傾向にあるが、海岸付近は流れが非常に微弱になり、方向が逆転しつつある。

ここでの流れの特徴は、河沿いに流速が大きく、そこから津波による浸水が先行していく状況が明らかにされたことと、浅川港内で、海岸に沿って反時計まわりの流れが生じて

いることである。実際のこの反時計まわりの流れは、水路部の報告書(1948)に記載された津波の実際の流向と一致している。

#### c) 津波による被害と水流圧力との関係

図-8(a)に、村上ほか(1985)の求めた家屋の破壊率Dの分布を示す。ここでDは、全壊ならびに流失家屋数と半壊家屋数の1/2の和が、全浸水家屋数に占める割合で定義されるものである。ところで家屋の流失、破壊などは、津波による水流圧力によってもたらされると考えられるから、数値実験で求められた各地点での流速の2乗と、地上の浸水高との積で水流圧力を代表する量と考え、その最大値の分布を(b)図に示した。この図で斜線を施した部分は浸水していないところで、5 m<sup>2</sup>/sec<sup>2</sup>以上の部分は薄く影をつけてある。またそれ以下の部分は白抜きで、2 m<sup>2</sup>/sec<sup>2</sup>の等値線を引いてある。

従来の研究(相田, 1977; 相田・羽鳥, 1982など)から、この値が5~8 m<sup>2</sup>/sec<sup>2</sup>に達すると、Dが50%以上になることがわかっている。実際、(a)で伊勢田川南岸や浦上川河口の南東部など、Dが71~100%の領域は、(b)で影をつけた部分に相当しており、また逆に、浦上川南岸の一部にみられるDが31~70%あるいは0~30%の領域は、(b)でもその部分が白く抜けていることがわかる。しかし浦上川河口左岸の31~70%と比較的破壊の少ない領域は、計算結果では水圧の著しい領域にあたり、また集落の中央付近にあたると思われる地域が、実際には71%以上の家屋破壊率になっているのに、計算結果では水流圧力が比較的小さい場所にあたり、

このように実際の状況と完全には一致しない部分があるものの、家屋の破壊率の大勢はこの数値実験では説明できるものと考えられる。

## 5. むすび

1946年南海地震津波により徳島県下で最大の犠牲者を生じた海南町浅川における津波の浸水状況を、浅海波方程式に基づいた数値実験によって調べた。計算された津波の高さは、海岸と観音堂の2地点では実測値とかなりよく一致する。しかし集落をはずれた陸上奥部では計算値は実測値よりも高くなっている。実測された浸水等高線の全体的傾向は計算では再現された。

津波による浸水はまず河川に沿って先行し、また浅川港海岸での流れの向きが汀線に沿って反時計まわりとなり、実際の流向の報告と一致する。

津波被害のうち家屋が破壊された地域の分布も、数値実験から得られた水圧力の最大値の分布とはほぼ一致することが示された。

謝辞：本研究に対し、適切かつ貴重な資料の提供を頂き、さらに現地をご案内下さった徳島工業大学の村上仁士教授および海南町の五軒家憲次助役に厚く御礼を申上げる。本研究は昭和62年度文部省科学研究費一般研究C「四国・九州地方を襲った過去の津波の浸水に関する研究」代表者；都司嘉宣東京大学助教授（課題番号 62540299）によって行われた。また数値計算は東京大学大型計算機センターを利用した。併せて記して謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 相田 勇：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—，地震研究所彙報，第52号，pp. 441—460，1977。  
相田 勇：南海道沖の津波の数値実験，地震研究所彙報，第56号，pp. 713—730，1981。  
相田 勇・羽鳥徳太郎：尾鷲市街に遡上した津波の数値実験，地震研究所彙報，第57号，pp. 337—350，1982。  
相田 勇・鳥羽徳太郎：和歌山県，湯浅・広

川両町に遡上した津波の数値実験，地震研究所彙報，第58号，pp. 667—681，1983。

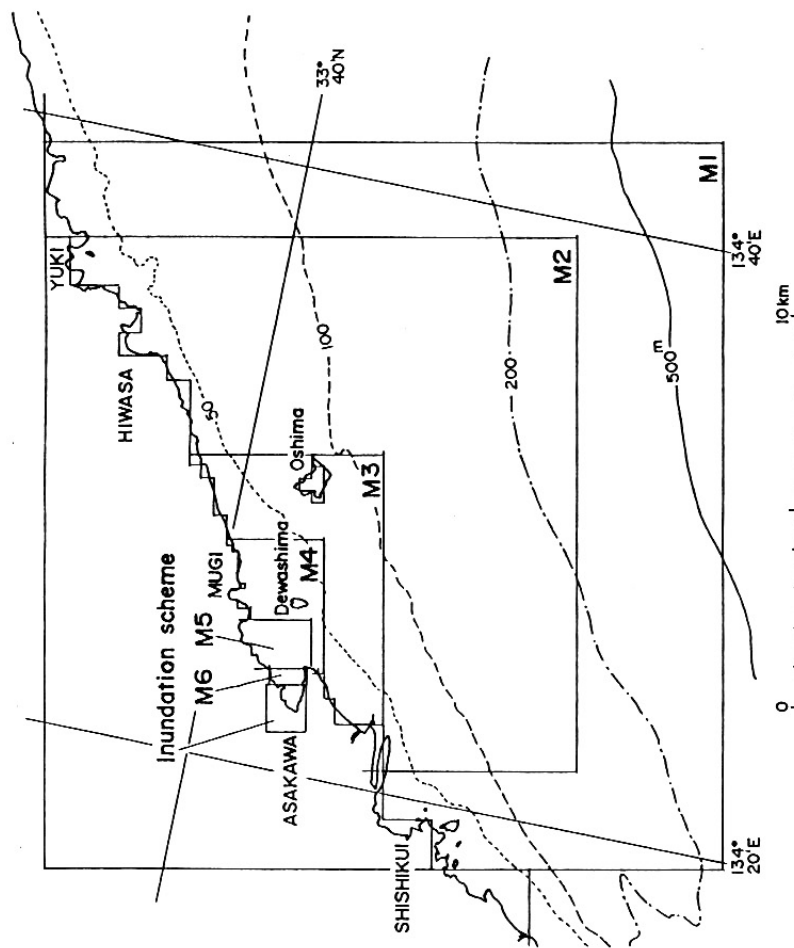
Ando, Masataka : Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquake along the Nankai trough, Japan. Tectonophysics, Vol. 27, pp. 119—140, 1975.

Ando, Masataka : A fault model of the 1946 Nankaido earthquake derived from tsunami data, Phys. Earth Planet. Inter., Vol. 28, pp. 320—336, 1982.

Kanamori, Hiroo : Tectonic implications of the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes, Phys. Earth Planet. Inter., Vol. 5, pp. 129—139, 1972.

村上仁士・島田富美男・細井由彦・見附敬三：徳島県浅川に遡上した1946年南海地震津波の挙動とその危険度の評価に関する研究，自然災害科学，4—2，pp. 12—26，1985。

水路部：昭和21年南海道大地震報告，津波篇，水路要増刊号，1948。



図一 徳島県浅川湾における津波数値実験計算格子系。M1, M2, M3, M4, M5, M6 はそれぞれ格子間隔2500, 1250, 625, 312.5, 156.25, 78.125mの領域を示す。

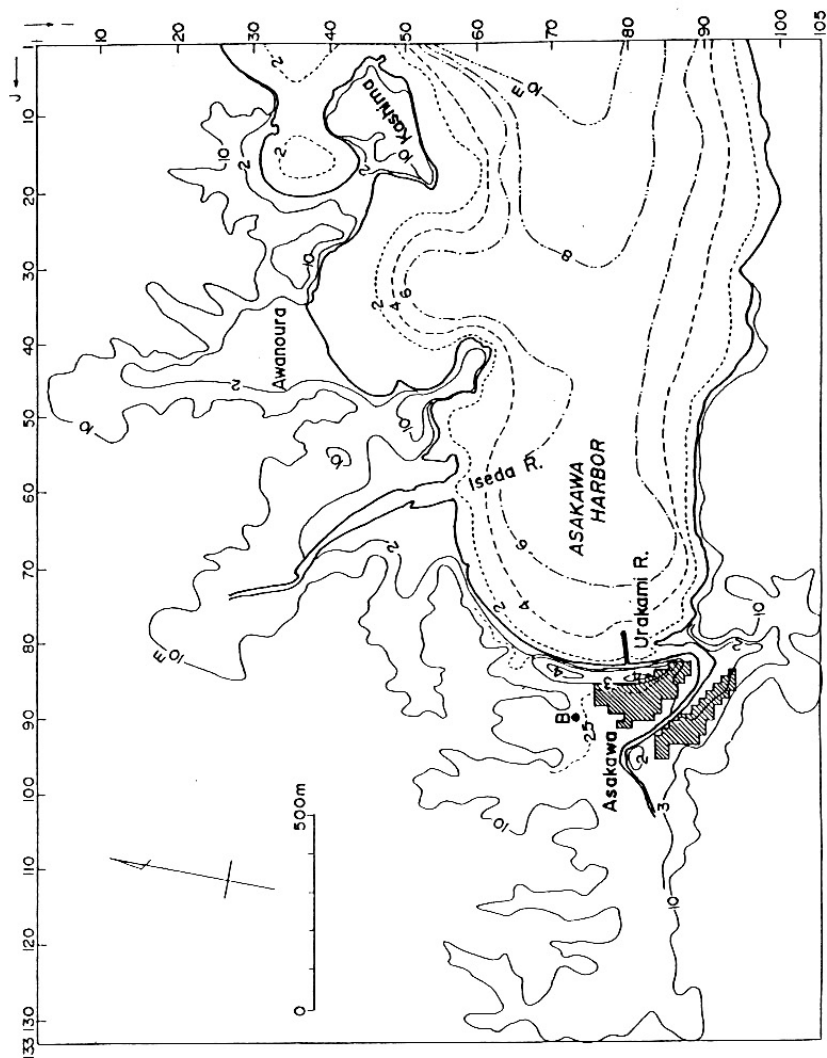


図-2 浅川湾奥の浸水計算領域。格子間隔は19.53m、陸上の標高および水深をT.P.を基準に等高線で示す(単位:m)。浅川の家屋が密集している地域を斜線で影をつけて示した。

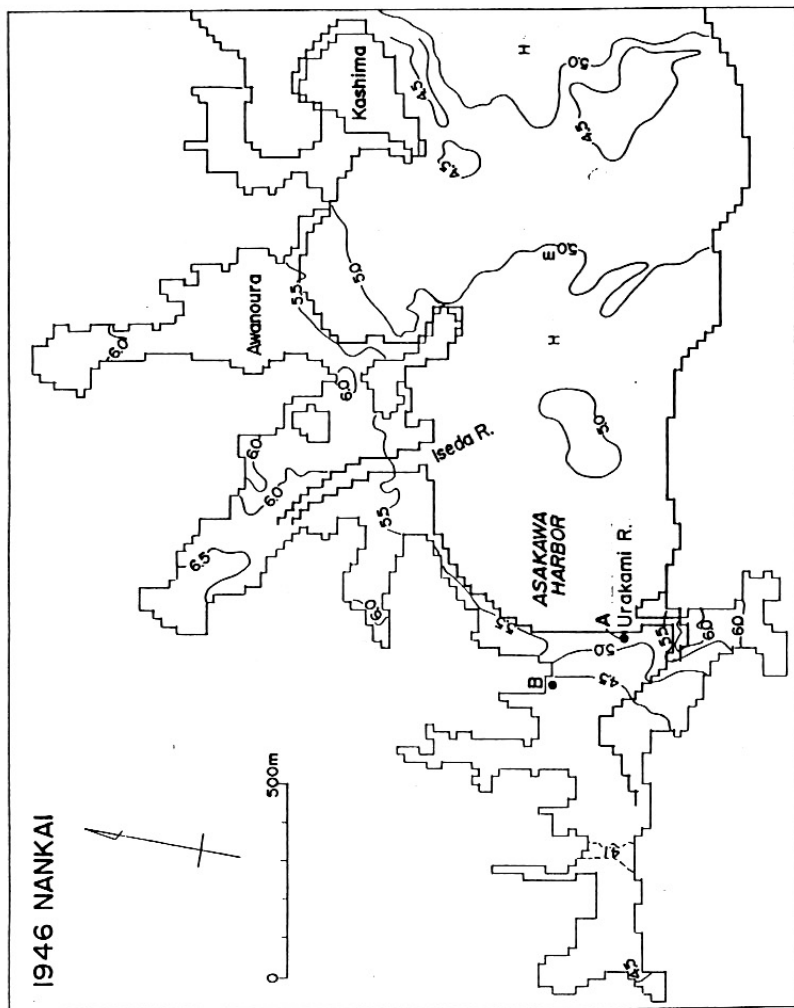


図-3 1946年南海津波に対する数値実験で得られた津波最高水位の分布。黒丸Aは漁村センター前の南海津波高さ標識(5.25m)、Bは観音堂石段の南海津波来襲地点標識(4.1m)。陸上の屈曲線は浸水域を示す。



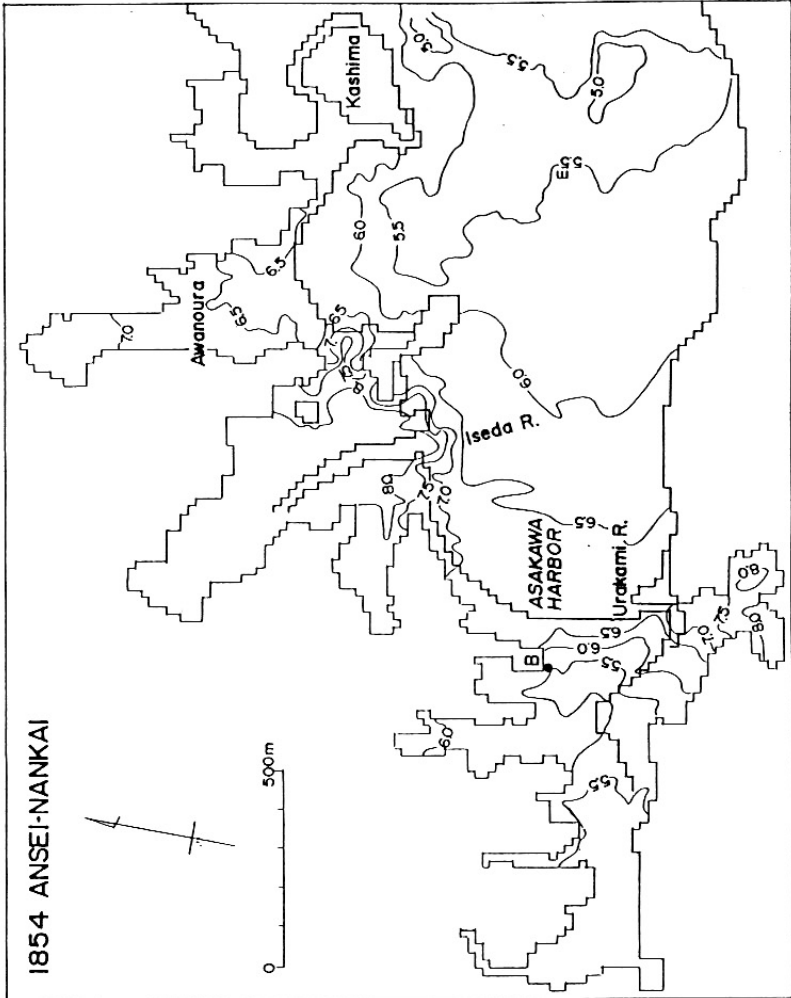


図-4 1854年安政南海津波に対する数値実験で得られた津波最高水位の分布。Bは観音堂石段の安政南海津波来襲地点標識(6.4m)。陸上の屈曲線は浸水域を示す。

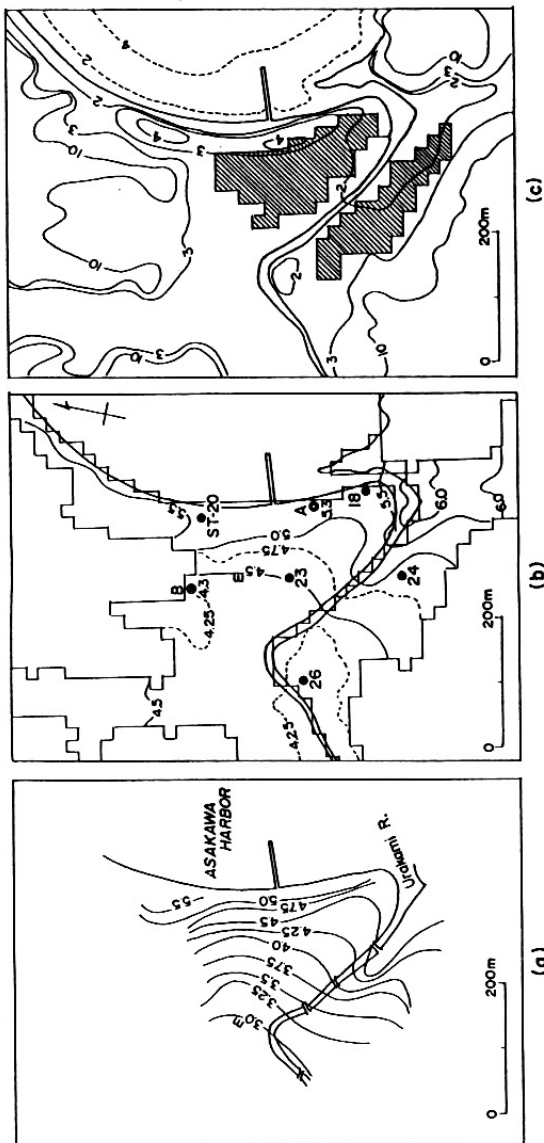


図-5 (a) 測量された1946年南海津波の浸水高分布 (村上ほか, 1985)。

(b) 数値実験で得られた浸水高分布。A, Bは図-3に説明した津波高さ標識で、数字は数値実験値。黒丸で示したST-20その他は図-7に水位波形を示す地点。

(c) 地形の等高線と家屋密集域(斜線で影をつけた部分)。

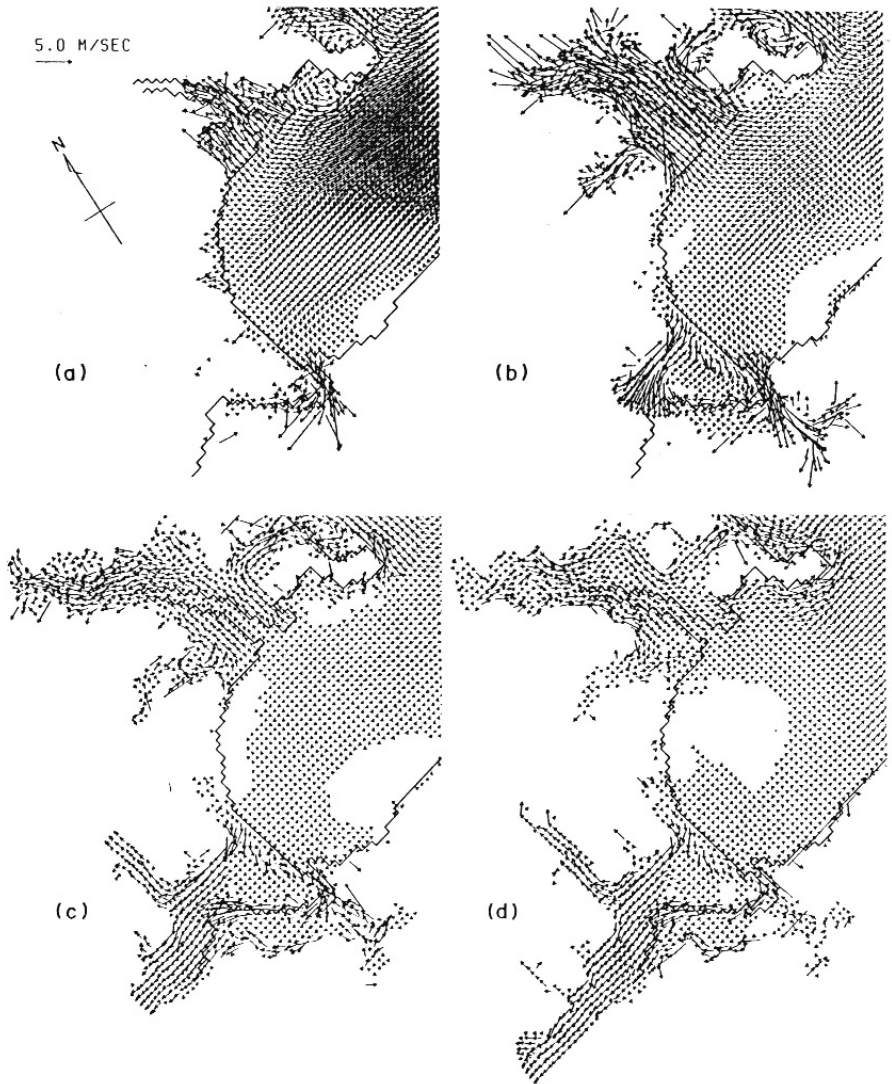


図-6 1946年南海津波に対する数値実験から得られた流速ベクトルの分布。(a), (b), (c), (d)はそれぞれ地震後45, 47, 49, 51分後の分布。

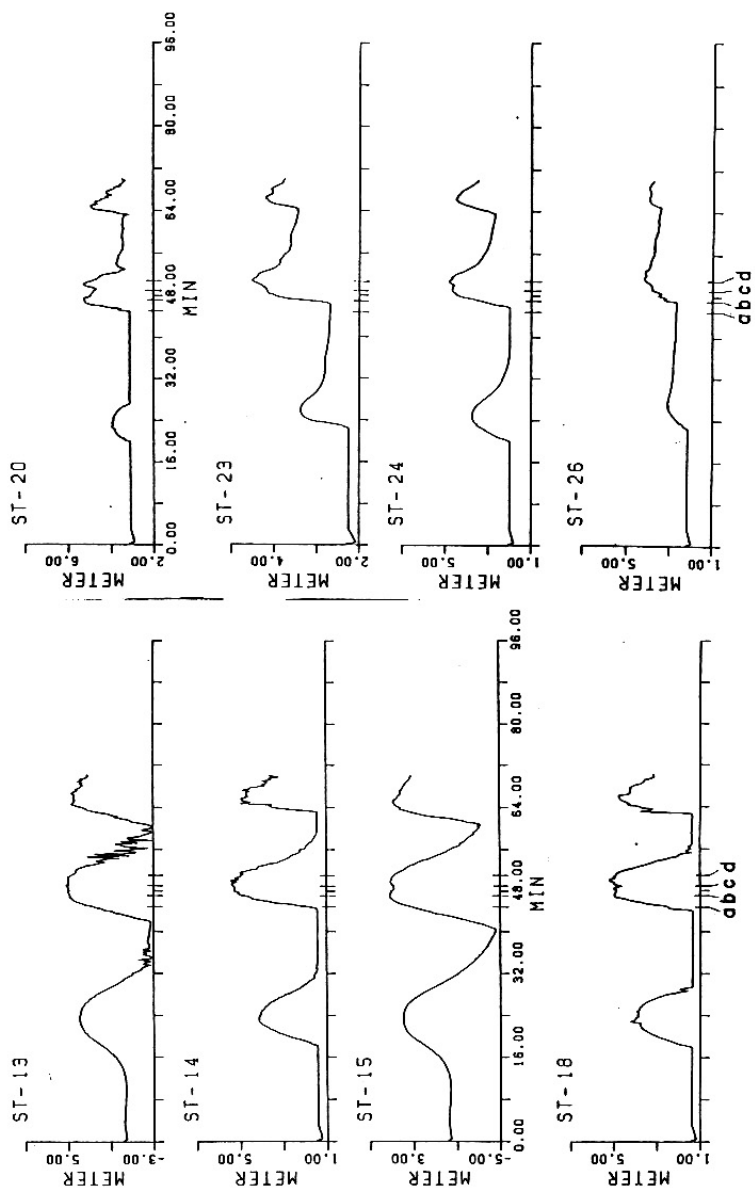
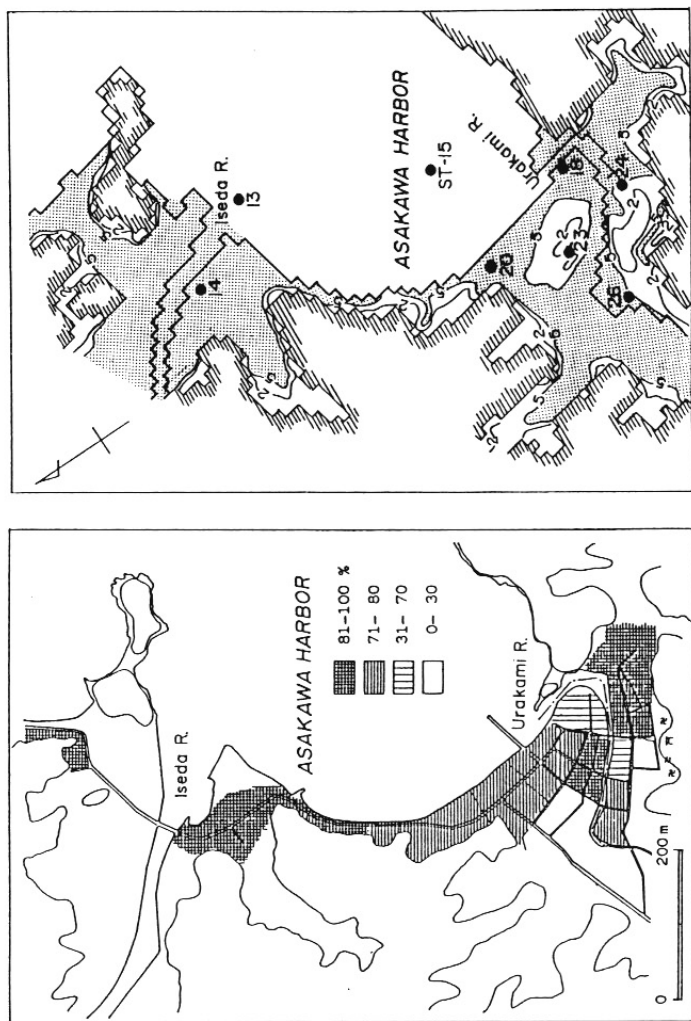


図-7 1946年南海津波に対する数値実験から得られた各地点の水位波形。地点番号と位置は図-5、図-8参照。a, b, c, dは図-6の(a), (b), (c), (d)図の時刻を示す。



(a)

(b)

図-8 (a) 1946年南海津波による家屋破壊率 (村上ほか, 1985)。

(b) 教道実験から得られた最大水流圧力 [(流速)<sup>2</sup> × (地盤上浸水深) m<sup>2</sup>/sec<sup>2</sup>] の分布, 影をつけた部分は 5 m<sup>2</sup>/sec<sup>2</sup>以上の地域。黒丸の番号は図-7に水位波形を示した地点。