

危機管理と津波避難マニュアル

河田 恵昭・小池 信昭

EMERGENCY MANAGEMENT AND EVACUATION MANUAL FOR TSUNAMI DISASTER

By *Yoshiaki KAWATA* and *Nobuaki KOIKE*

Synopsis

In 1993 and 1994, we had two earthquakes in Hokkaido island, Japan. Both earthquakes accompanied with tsunamis. From our field study, radio communication of tsunami warning systems and issue of evacuation are inadequate in almost every local area due to lack of the information facilities transmitted to individual residents and misunderstanding on tsunami behavior by local government. We have sequential events in the process of the communication in which every event may introduces and enlarges the disaster damages. In order to mitigate the human damages due to immediate coming tsunamis or well-prepared tsunamis after earthquake, it is necessary to arrange tsunami evacuation manuals in every local areas. In the case of gigantic tsunami in densely populated area, disaster management is very important to mitigate human and property damage. Numerical simulation technique is very useful to give practical information about the tsunami behavior such as the highest tsunami and the shortest arrival time. In emergency management, humanware management and commandware one are also very important as well as hard and software management at the moment of disaster occurrence.

1. 緒 言

津波による人的被害を軽減するためには、安全な場所にできるだけ早く避難することである。しかし、現在、発生がもっとも憂慮されている東海地震や、2015年頃に起こると予測されている南海地震では、それらの震源位置によっては地震後数分で津波がやってくる地域が存在する。しかも、残念なことにこれらの地域では、地震が予知できることを前提とした防災計画であったり、あるいは津波防災施設すら未整備であることも事実である。したがって、このような現状では、場合によって死者が千人を超えるような巨大津波災害になることも想定しなければならない。そこで、本論文では、まず、危機管理論の立場から、津波減災の方法を提案する。つぎに、住民の迅速な避難行動を誘発させる、想定津波危険度が評価された津波避難マニュアルの作成方法を示す。

2. 自然災害の危機管理の定義

わが国の自然災害対策は、1961年に施行された災害対策基本法に則って行われている。この法律は、1959年の伊勢湾台風高潮災害を契機として準備されたものであって、当時としては世界に類を見ない総合

的な災害対策であると評価されている。しかし、30 数年経過して改めてこの条文を読み直すと、幾つかの点で現状と合わない部分が出てきている。その中で、もっとも問題となるのは、今回はからずも阪神・淡路大震災で露呈したように、都市災害を想定していないことである。基本法が制定された 30 数年前と比較して、最大の社会環境変化は都市化であろう。しかも、わが国の大都市は例外なく臨海部に位置しており、都市化による人口稠密地域は沿岸部に展開していると言っても過言ではない。ここに異常外力が働いたとき、どのようなことが起こるかという想定被害の項が、この法律ではまったくと言っていいくらい欠落している。そのため、防災基本計画の 1 つの柱である地域防災計画では、都道府県や市町村レベルでも、実際にどのような被災形態となるかというような観点の欠落、もしくはほとんど考慮されていない。すなわち、被災シナリオがないのである。

ここで、危機管理（エマージェンシーマネジメント）をつぎのように定義する。

あらゆる種類の災害、事故、犯罪などによって、大量の人命や財産あるいは社会的信用や安定が失われる恐れがある場合に、政府や自治体、企業などの組織が、通常業務を超えてとる事前・事後の対応行動

自然災害の危機管理は、災害発生前のリスクマネジメントと災害発生時と災害後のクライシスマネジメントに区分される。わが国のこれまでの災害対策は、災害が発生しないようにすることに重点が置かれていたと言える。したがって、大部分はリスクマネジメントであって、クライシスマネジメントが非常に少ない。そのために、もし大災害が起これば行き当たりばったりで、不眠不休とならざるを得ず、挙げ句の果ては、防災担当者は全員玉砕となるわけである。阪神・淡路大震災はまさにこのような状態であったと言ってよいだろう。

3. 巨大津波災害の危機管理の内容

3.1 責任追求型から原因追求型への移行の必要性

阪神・淡路大震災では、人的被害の大きさを政府の危機管理能力のなさのせいにするマスコミや各界の指導者の批判が目立つ。今回の震災で自衛隊の出動が遅れた、政府の情報収集能力がなかったなどという問題だけを危機管理問題として歪曲してはならない。災害原因追求の過程では、わが国の過去の例では責任追求型が多く、マスメディアが先頭に立ってスケープゴード捜しに夢中になり、その後は急激に熱が冷めるのが常であろう。むしろ原因追求型の流れから、その再発を防ぐことが重要である。

ところで、自然災害では、作用する外力の大きさと地域の社会構造、とくに人口の絶対数と人口密度によって被害の時空間的な広がりには差が出てくる。まず、被害が長時間に継続すれば二次災害と呼ばれるようになる。たとえば、地震によって人的被害が発生し、建物やライフラインが多く被害を受け、その後やってきた津波でさらに被害が拡大する場合である。復旧・復興事業の遅れによる経済的な打撃の深刻さが典型であろう。さらに、空間的な広がりが大きくなれば複合災害と呼ばれるようになる。広域災害という言葉があるが、これは単なる被害域の広さを示すものである。複合災害では、複数の被災シナリオが同時的に、また時系列的に進行する場合であって、その根底に人口稠密地域での多元・多様社会構造が存在している。1993 年の北海道南西沖地震災害では、奥尻島の青苗地区で地震の発生－津波来襲－火災発生という一連の時系列な災害が起こったが、これは複合災害の分かりやすい例であると言えよう。

3.2 津波災害の危機管理

危機管理の対象は、Table 1 のような 4 つのウエアを対象としている。それらは、ハード、ソフト、ヒューマン及びコマンドウエアと名づけられ、その内容をまとめれば、防災構造物、災害情報、人間対応及び管理系統となろう。そして、わが国のように歴史的にかなりの程度、防災対策が行われてきたにもかかわらず巨大津波災害となるのは、それぞれのウエアの幾つもの要因が複雑に絡み合って、これらが連鎖

Table 1. Emergency management and its classification.

	emergency management	
	risk management	crisis management
hardware	reduction or mitigation return period, encounter probability, fail-safe, redundancy	recovery reinforced lifeline, temporal housing
software	abundance disaster information, training, planning, education, evacuation manual	communication recovery information of lifeline, provision of emergency necessities
humanware	preparedness search & rescue, volunteer, psychological counsellor	response care for PTSD, emergency medical care
commandware	tactics headquarter of disaster measure, command system, management system	strategy logistics, long-term reconstruction

的に発生する場合であろう。したがって、津波防災・減災対策は、それらの原因や要因の存在をまず孤立化させることである。そうすれば、津波災害がたとえ起こっても、比較的容易に対応できる。わが国と違って地震発生の予測ができないことを前提とした米国の地震災害対策で、マネージメントの考えが減災政策の中心に位置するのはこの理由による。

つぎに管理の内容であるが、まず、リスクマネージメントを取り上げよう。ハードウェアでは、被害軽減 (reduction あるいは mitigation) であり、津波の波高の決定には確率的な要素 (probabilistic factor) がどうしても入ってくる。表中の再現期間とは、想定する津波が何年に一度起こるかという年数であり、遭遇確率とは、被災可能者の生涯の内に想定津波に遭遇する確率である。安全率を大きく取った冗長性 (redundancy) や二重防止策のようなフェールセーフも含まれ、これらを考慮した津波防波堤や津波水門の建設が当てはまる。つぎに、ソフトウェアでは、津波に関する知識の習得、防災訓練、防災計画、防災地理情報システム (GIS) などの情報の豊かさ (abundance) が対象となろう。津波警報、津波避難マニュアルも含まれよう。ここで強調したいのは、単なる“知識”の豊富さに止めておくのではなく、人びとの“知恵”にまで変化しなければならないことである。そのために、たとえば津波避難マニュアル作りでは住民参加や、地域細分化による想定被害の評価も必要となろう。ヒューマンウェアでは、救急医療体制の整備などの事前準備 (preparedness) が対象となり、それに含まれる項目は津波のみならず、あらゆる自然災害に共通となる。コマンドウェアは危機管理組織や想定被害などの防災戦術 (disaster tactics) が対象となろう。

一方、災害発生時からその後を対象とするクライシスマネージメントとしては、Table 1 のように、復旧・復興 (recovery) であり、津波防災構造物の設計条件の変更や津波に押しつぶされた住居のガレキや廃棄物の処理などが含まれる。また、ソフトウェアについては、津波被害の概要の早期把握や電力や通信などのライフラインの復旧情報、救援物資の配布状況などの広報 (communication) が、ヒューマンウェアについては、救出・救助活動や家族や友人が犠牲になったことによって受ける心理的な傷によるストレス (心的外傷後ストレス障害, Post Traumatic Stress Disorder, PTSD) の軽度化に向かったケアとか重傷者の転院などの被災者への対応 (response) である。Fig. 1 は、阪神・淡路大震災時に、神戸市消防局のレスキュー隊に救出された被災者の、時間的な生存者数を示したものである。救出された 1,888 名中 733 名が生存していたが、生存者の 96% が最初の 3 日間に集中していることが見いだされる。これは従来より“黄金の 72 時間”と呼ばれるものであって、いかに早期の救出活動が重要かが理解できる。さらに、コマンドウェアの内容として、復旧物資、人員などの手配や補給計画などの兵たん計画や危機管理能力の評価などが含まれる。Table 1 を見ると、従来の津波防災では、ハードウェアと一部のソフトウェアがリスクマネージメントの対象として考慮されていたに過ぎないことがわかる。津波防災システムとは、表に

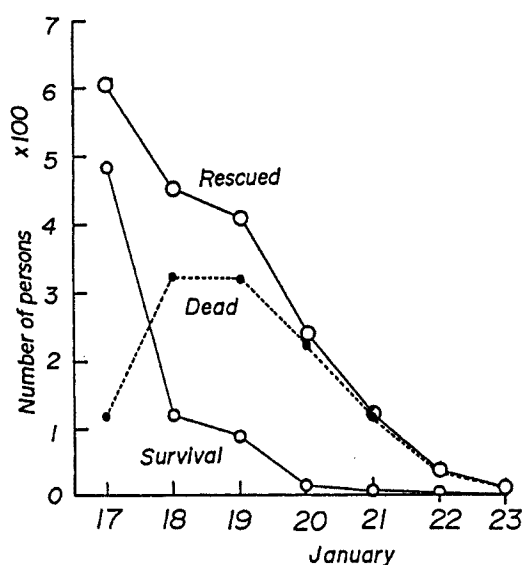


Fig. 1. Search & rescue and golden 72 hours in response stage in Kobe city.

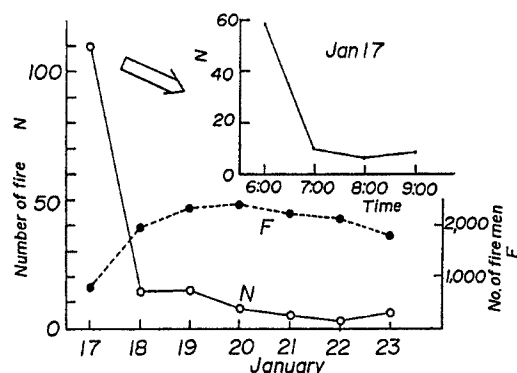


Fig. 2. Changes of fires and fire fighters with time in Kobe city.

示したそれぞれの項目が十分達成されてはじめて総合的な効果を発揮するものであって、たとえば津波防波堤の建設のみによる一点豪華主義は人口稠密な都市域では駄目であろう。津波が臨海都市に襲来すれば、都市の弱点をねらい打ちにしてくることになる。そこでは、インナーシティなどの、都市計画、治水、下水道、街路事業などの課題を抱える地域がとくに災害に弱いと言える。

4. 緊急対応組織の提案

4.1 危機対応の遅れ

阪神・淡路大震災に際して、各自治体の対応がなぜ非常に遅かったかを考察し、すでに、つぎの4つの原因にまとめられることを示した¹⁾。それによれば、1) 防災関係者の絶対数が足らなかったこと、2) 自然災害の未経験者が自治体職員だけでなく都市住民の中でも大半であったこと、3) 情報ネットワークの崩壊と広域的な住民被害が同時に起こったこと、及び4) 防災問題は、結局人の問題であるということの認識の欠如、である。Fig. 2は各自治体からの神戸市への消防隊員派遣数と火災発生数の時間変化であって、前者の立ち上げが遅いことが認められる。これは、典型的な逐次投入 (piecemeal attack) と呼ばれるものであって、様子を見ながら増強するという危機対応上の悪例となっている。

4.2 新しい緊急対応組織の提案

都道府県レベルでの緊急対応組織の試案を示そう。ここでは、自然災害を暴動などと同じレベルの

危機管理として対応している米国の連邦危機管理庁 (Federal Emergency Management Agency, 略称 FEMA) などの例をとくに参考にし、わが国の実状も勘案している。ただし、これが最終案ではなくて、今後の阪神・淡路大震災の解析を経て、さらに改良される可能性がある。

(1) 広域災害対策本部の設置

被害を受けた自治体を集合した対策本部を知事を本部長として県庁内に設置する。被災者の救命・救援を最優先し、本部長の権限であらかじめ決めた手順に従って、消防レスキュー隊、警察及び自衛隊による被災者の捜索と救助を指令もしくは要請する。災害時には関係者以外の立ち入りを厳重にチェックしながら、危機管理室として作業できるように、会議室、情報室、資料室から構成される空間が必要である。県レベルの危機管理室は政府のそれと情報がオンラインで結ばれている必要がある。なお、市や町からは災害時にそれぞれの災害対策副本部長クラスがヘリコプターなどを使って緊急に集結できるシステムが必要である。

(2) 災害対策センターの設置

知事の任命を受けた災害対策統括官がこのセンターの活動の責任をもつ。県庁内の各部局長と警察及び消防の担当官から構成される。その任務は、

- (a) マスメディアに対する広報の一元化及び臨時に 24 時間放送できるテレビ及び FM 放送局の開局
- (b) 各地区対策本部の災害復旧の指令と調整。なお、各地区対策本部の主な任務は、避難所の開設、救援物資の手配と配給、ボランティアの避難所などへの割当て、社会弱者の救援、被災者の登録、犠牲者の安置と火葬手配、学童の教育支援、メンタル・ケアなどである。
- (c) ボランティアの受け入れと各地区対策本部への割当て及び日本赤十字社などの慈善団体への要望の一本化
- (d) 避難所の開設や各被災者への復旧状況に関する情報の提供
- (e) ライフライン関係の各省庁の出先機関、特殊法人、公益企業の担当者から構成される社会基盤施設復旧センターの設置と、復旧に関しての自治体側からの要望及び復旧情報の提供依頼
- (f) 広域行政協力を結んでいる自治体への応援要請
- (g) 政府に設置される各省庁から構成される災害対策本部などへの要望
- (h) 災害対策本部の指令の徹底と情報提供
- (i) 防災地理情報システム（防災 GIS）の構築と被災、復旧情報の一元的管理と情報の公開

Fig. 3 は以上の内容を示したものである。この組織図で最も重要な視点は、災害が発生すれば、被災者が主役であって、行政側は何ができて何ができないかを明確にすることであろう。前述した災害対策センターの活動が、そこに関係する部局の人数に比例するようなものであってはならないのは当然である。縦割り行政と言われる部局間の調整をこのセンターは行わねばならない。危機管理とは、例えてみれば、自然災害という戦争でいかに勝つかということであろう。今回の国及び地方行政レベルの対応方法はまさしく玉砕主義であって、現場の行政関係者の数日以上にわたる徹夜のがんばりだけで対応したといっても過言ではない。ノースリッジの災害復旧に当たっていた連邦、カリフォルニア州、ロスアンジェルス郡、市の関係者が、嚴重な労務管理のもとで、しかも有能な管理者の指示を得て復旧活動していた姿とは余りにも差が大きすぎる。

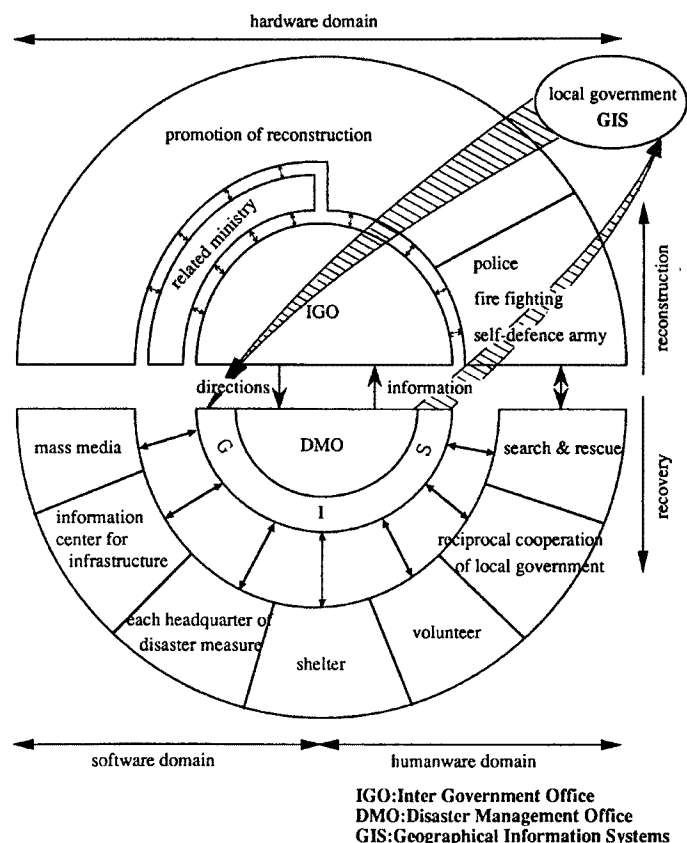


Fig. 3. Headquarters for disaster measure in state and city level.

5. 津波伝播の数値計算法

5.1 基礎方程式

津波の運動は、一般に長波理論式で記述することができる。通常、津波の数値計算では、取り扱う計算領域に応じて線形長波理論式と非線形長波理論式の2つの基礎方程式が用いられる。

線形長波理論式は、水深の大きい波源地域から対象地点の沖合までの伝播計算に用いられる。海底から水面まで鉛直方向に積分した形で線形長波理論式を表すと、次のようになる²⁾。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

一方、非線形長波理論式すなわち浅水理論式は、海岸近くでの津波の挙動を表すのに用いられる。線形理論と同様に、非線形長波理論式を積分形で表すと、次のようになる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{M}{D} \cdot \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{N}{D} \cdot \frac{\partial M}{\partial y} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{f}{D^2} MQ = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{M}{D} \cdot \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{N}{D} \cdot \frac{\partial N}{\partial y} + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{f}{D^2} NQ = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 (x, y) は水平の直交する2方向の座標、 t は時間、 η は水位変動、 h は静水深、 ξ は海底変動量、 D は $D = h + \eta - \xi$ で表される全水深、 g は重力加速度、 f はマンニングの粗度係数 n を用いて $f = gn^2/D^{1/3}$ で表される海底摩擦係数、 (M, N) はそれぞれ (x, y) 方向の流量フラックス、 Q は $Q = \sqrt{M^2 + N^2}$ である。

5.2 差分式

上に表した基礎方程式 (1)~(6) をリープ・フロッグ法で差分化すると、次のようになる。

線形長波理論式 (1)~(3) の差分式は、

$$\eta_{i,j}^{k+1} = \eta_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta s} \left(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - M_{i-\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} + N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - N_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{3}{2}} = M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - gh_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\Delta t}{\Delta s} (\eta_{i+1,j}^{k+1} - \eta_{i,j}^{k+1}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{3}{2}} = N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - gh_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{\Delta t}{\Delta s} (\eta_{i,j+1}^{k+1} - \eta_{i,j}^{k+1}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

のように表すことができる。

一方、非線形長波理論式 (4)~(6) の差分式は、

$$\eta_{i,j}^{k+1} = \eta_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta s} \left(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - M_{i-\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} + N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - N_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\begin{aligned}
M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{3}{2}} &= M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\Delta s} \cdot g D_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \left(\eta_{i+1,j}^{k+1} - \eta_{i,j}^{k+1} \right) - \Delta t \cdot \frac{gn^2}{\left(D_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \right)^{\frac{7}{3}}} Q_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \\
&\quad - \frac{\Delta t}{\Delta s} \cdot \frac{M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}}}{D_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}}} \cdot \left\{ \begin{aligned} &\left(M_{i+\frac{3}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \left(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} < 0 \right) \\ &\left(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - M_{i-\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \left(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \geq 0 \right) \end{aligned} \right\} \\
&\quad - \frac{\Delta t}{\Delta s} \cdot \frac{N_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}}}{D_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}}} \cdot \left\{ \begin{aligned} &\left(M_{i+\frac{1}{2},j+1}^{k+\frac{1}{2}} - M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \left(N_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} < 0 \right) \\ &\left(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - M_{i+\frac{1}{2},j-1}^{k+\frac{1}{2}} \right) \left(N_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \geq 0 \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{3}{2}} &= N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\Delta s} \cdot g D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \left(\eta_{i,j+1}^{k+1} - \eta_{i,j}^{k+1} \right) - \Delta t \cdot \frac{gn^2}{\left(D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right)^{\frac{7}{3}}} Q_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \\
&\quad - \frac{\Delta t}{\Delta s} \cdot \frac{M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}}{D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}} \cdot \left\{ \begin{aligned} &\left(N_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right) \left(M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} < 0 \right) \\ &\left(N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - N_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right) \left(M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \geq 0 \right) \end{aligned} \right\} \\
&\quad - \frac{\Delta t}{\Delta s} \cdot \frac{N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}}{D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}} \cdot \left\{ \begin{aligned} &\left(N_{i,j+\frac{3}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right) \left(N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} < 0 \right) \\ &\left(N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - N_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right) \left(N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \geq 0 \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)
\end{aligned}$$

のように表すことができる。

ここに、 $\eta_{i,j}^{k+1}$ は計算格子 (i, j, k) における水位、 $M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}}$ は計算格子 $(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2})$ における x 方向の流量フラックス、 $N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}$ は計算格子 $(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})$ における y 方向の流量フラックス、 $h_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}}$ は計算格子 $(i+\frac{1}{2}, j)$ における静水深、 $\xi_{i+\frac{1}{2},j}$ は計算格子 $(i+\frac{1}{2}, j)$ における海底変動量、 $D_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}}$ は $D_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} = h_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} + \eta_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - \xi_{i+\frac{1}{2},j}$ で表される全水深、 Δs および Δt は空間および時間方向の差分間隔である。

5.3 計算領域と計算時間

数値計算の計算領域は、従来の研究成果^{3),4)}を参照して、**Fig. 4** に示すように外海である太平洋（領域1）、紀伊水道（領域2）、大阪湾（領域3）の3領域に分割し、空間格子の寸法を領域1では5 km、領域2では2.5 km、領域3では1.25 kmと順次小さくしていった。領域1では線形理論式を用い、領域2および領域3では非線形理論式を用いた。そして、各領域で最小水深を5 mとした。

また、計算時間間隔は差分の安定性を考慮して、すべての領域でいわゆる C.F.L. 条件、

$$1 \geq \sqrt{2gh_{\max}} \frac{\Delta t}{\Delta s} \dots\dots\dots (13)$$

を満足するように10 secとし、計算時間は4時間まで行うことにした。ただし、 $h_{\max}$ は各領域における最大水深を表す。

5.4 地震断層モデル

地震断層運動は、微細に見ると非常に複雑な過程をもつが、運動全体を巨視的に見ると簡単なモデルで

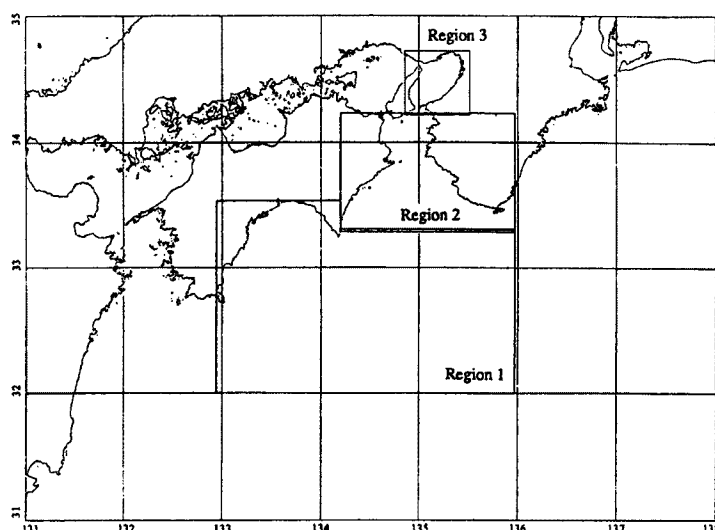


Fig. 4. Domain of numerical simulation.

表すことができる。最も単純なモデルは、長さ L 、幅 W の長方形の断層面が平均的に、すべり量 D だけ互いにずれると考えるものである。断層の幾何学的特性は、すべりの方向 λ 、断層の走向 ϕ 、断層面の傾斜角 δ によって表される。以上の6個が最も簡単な断層パラメーターで、地震波解析により推定される。

上記の断層パラメーターが与えられると、断層近傍の海底面（地表面）での鉛直変位分布は、弾性論を基礎とした Mansinha・Smylie⁵⁾の方法により、計算で求めることができる。

本研究で使用した断層モデルは、安政南海道地震(1854)については Fig. 5 に示すように相田⁶⁾の Model 20', 南海地震(1946)については Fig. 6 および 7 に示すように安藤^{7), 8)}が提案した断層モデルである。これらの断層モデルの断層パラメーターを Table 2 に表す。

5.5 初期条件

初期条件としては、地震断層モデルから Mansinha・Smylie 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。実際の地震断

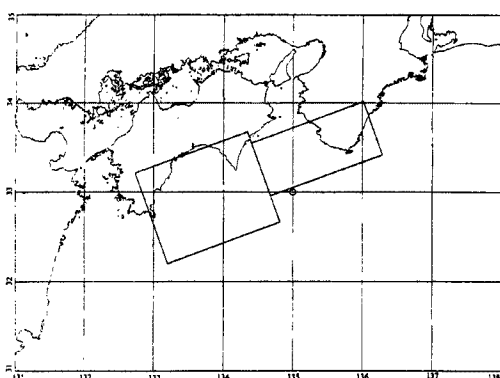


Fig. 5. Location of epicenter and fault model proposed by Aida (Model 20') (open circle indicates the epicenter)

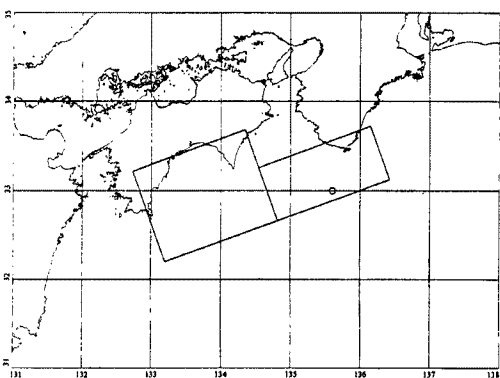


Fig. 6. Location of epicenter and fault model proposed by Ando (1975) (open circle indicates the epicenter)

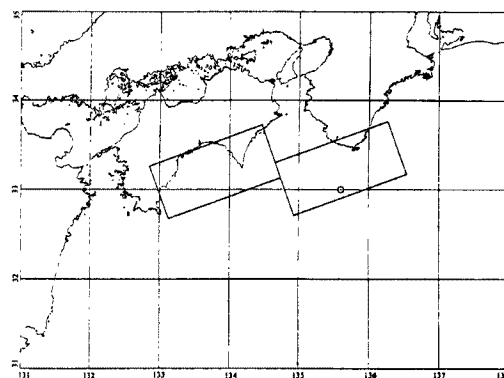


Fig. 7. Location of epicenter and fault model proposed by Ando (1982) (open circle indicates the epicenter)

Table 2. Parameters of fault model.

Fault Model		L (km)	W (km)	δ (°)	Φ (°)	Z (km)	U_s (m)	U_d (m)
1946 NANKAI ANDO (1975)	E part	150	70	25	N 20 W	1	1.79	3.58
	W part	150	120	20	N 20 W	1	2.68	5.37
1946 NANKAI ANDO (1982)	E part	150	70	25	N 20 W	1	1.79	3.58
	W part	150	70	20	N 20 W	1	2.68	5.37
1854 ANSEI AIDA (Model 20')	E part	150	70	10	N 20 W	10	2.8	3.7
	W part	150	120	20	N 20 W	1	2.8	5.6

L : fault length, W : fault width, δ : dip angle, Φ : dip direction, Z : depth of the upper rim of the fault plane, U_s : strike slip component (right lateral), U_d : dip slip component (reverse)

層運動においては、地盤変動は数秒から 100 秒程度の継続時間をもつことが知られているが、津波発生時の水位変動としては、瞬間的に海面上に変化が生じた場合と、1～2 分の立ち上がり時間で完了させた場合とでは、ほとんど差がないことが確認されている⁹⁾。

5.6 境界条件

まず、陸地との境界では、津波が完全反射するとして、境界面に垂直な流量フラックスを 0 とした。計算領域と接する外海との境界では、 $M^2 + N^2 = gD\eta^2$ の関係を用いて、流量フラックス M, N を計算した。明石海峡および鳴門海峡では、反射率を 0 とし谷本ら¹⁰⁾の任意反射率境界の条件を用いた。また、2つの領域間の接続は、広領域に狭領域の 1 格子分を重ね合わせ、内挿により接続部分の流量フラックスおよび水位上昇量を与えた。

6. 津波伝播モデルの適用性に関する考察

6.1 海底摩擦係数

本モデルでは、海底摩擦係数 f として、マンニングの粗度係数 n を用いて、

$$f = \frac{gn^2}{D^{\frac{1}{3}}} \dots\dots\dots (14)$$

を採用している。

一般に、津波の数値計算では、海底を規則的な断面をもつ大流路と考えて、マンニングの粗度係数を $n = 0.025$ とおくことが多いようである。しかし、その値は三陸沖のような深い海底をもつ地域で用いられており、遠浅の海底が続く大阪湾では、 $n = 0.020$ を用いることにした。

6.2 南海道津波の再現

本モデルの適用性を確認する目的で、あらかじめ過去に発生した津波の再現計算を行う。その結果を水路部¹¹⁾による調査および羽鳥¹²⁾が調査した観測値と比較して、本モデルの適用性について考察する。

(1) 安政南海道津波 (1854)

前述したように安政南海道津波 (1854) の再現計算で使用した地震断層モデルは、相田の Model 20' である。この断層モデルから Mansinha・Smylie の方法で計算した鉛直地盤変位をそのまま初期波形として与えて数値計算を行った。そして、数値計算によって求められた最大水位の地域分布を Fig. 8 に、それを羽鳥が調査した観測値と比較したものを Fig. 9 に表す。Fig. 9 を見ると、領域 1 については、全体の傾向として良い一致を示している。また、領域 2 の徳島県側でも、傾向の一致はまずまずである。さらに、

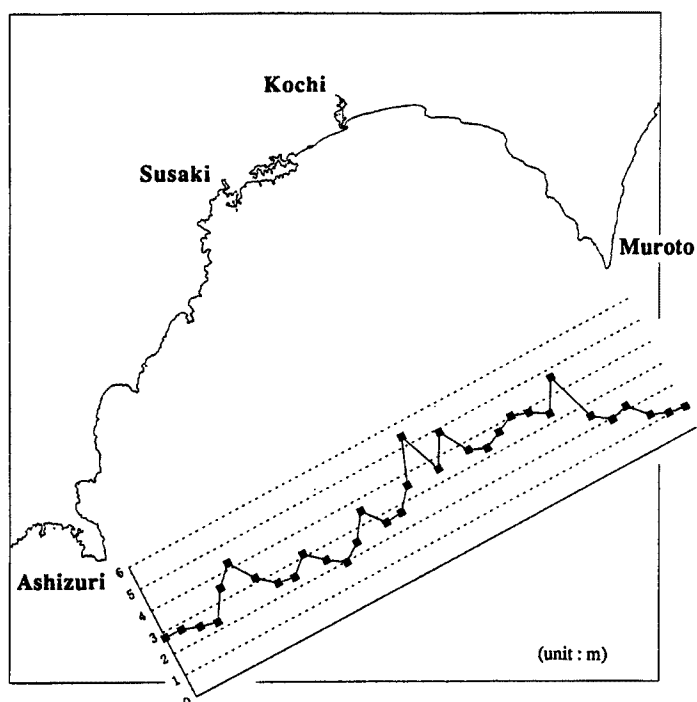


Fig. 8 (a). Spatial distribution of maximum water level due to the 1854 Ansei Nankaido earthquake tsunamis given by numerical simulation around Tosa bay.

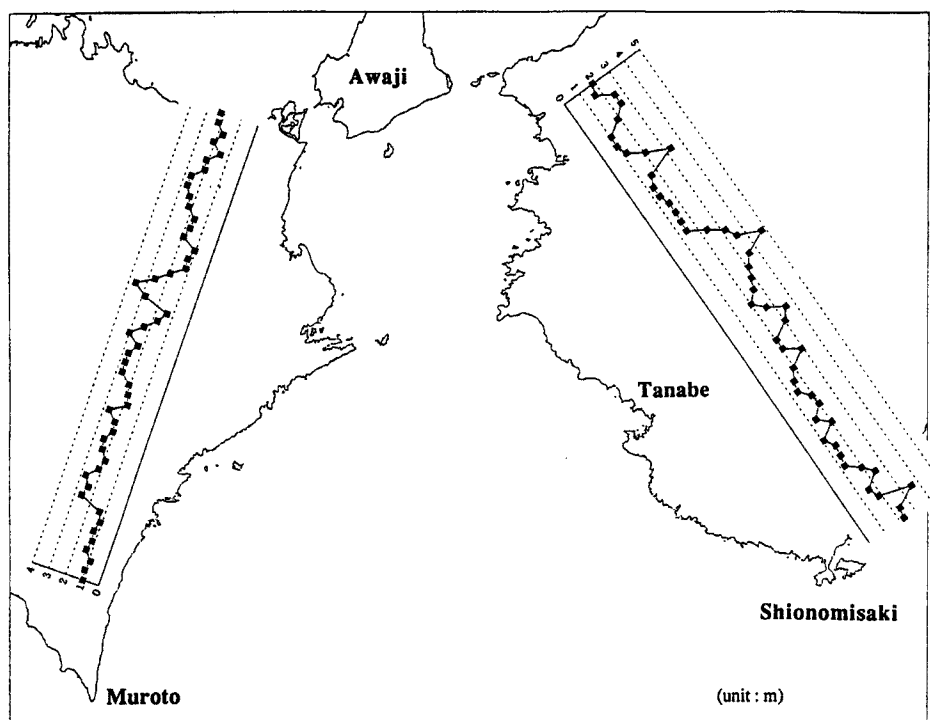


Fig. 8 (b). Spatial distribution of maximum water level due to the 1854 Ansei Nankaido earthquake tsunamis given by numerical simulation around the Kii strait.

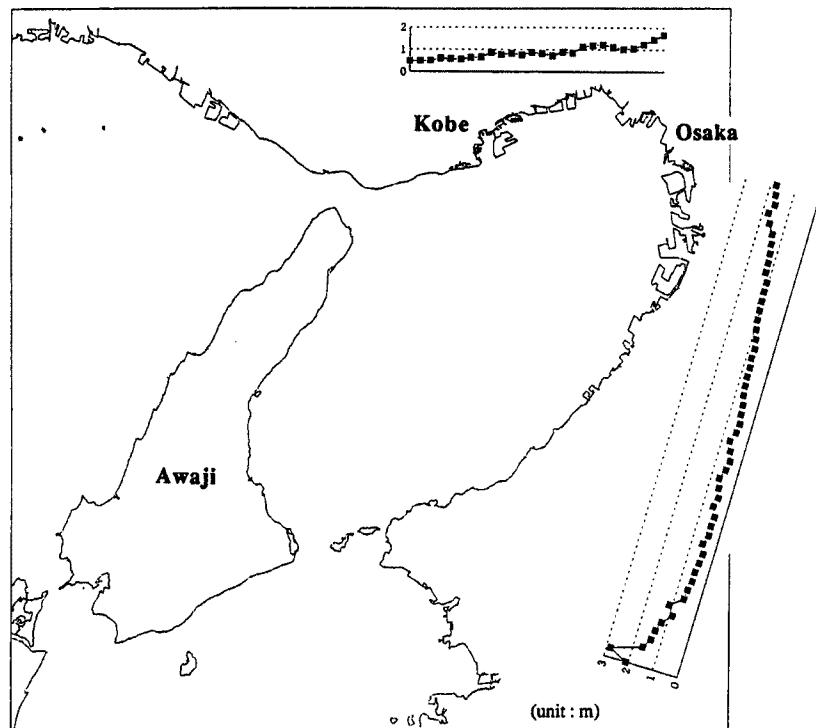


Fig. 8(c). Spatial distribution of maximum water level due to the 1854 Ansei Nankaido earthquake tsunamis given by numerical simulation around Osaka bay.

領域2の和歌山県側では、一部逆転する地域があるものの、傾向としては比較的良好な結果となっている。領域3については、観測値のある場所が少ないので判断が困難であるが、他の領域と同様に傾向としては良い。

(2) 南海津波(1946)

まず、安藤が1975年に提案した断層モデルで、南海津波(1946)の再現計算を行った。数値計算によって求められた最大水位の分布をFig. 10に、それを羽鳥が調査した観測値と比較したものをFig. 11に表す。Fig. 11を見ると、領域1では、宇佐よりも東の地域で計算結果が観測値よりもかなり大きくなってしまっている。また、領域2の徳島県側でも橘湾以北で、計算結果が観測値よりも大きくなってしまっている。一方、領域2の和歌山県側では、御坊を除いて傾向としてはかなり良い一致を示していると言える。領域3については、計算結果が観測値よりも大きくなる場所がいくつかある。

つぎに、安藤が1982年に提案した断層モデルで、南海津波(1946)を再現してみた。その結果が、Fig. 12である。領域1では、浦戸および岸本で計算値が観測値よりも大きい、1975年モデルよりは良い近似と言える。領域2の徳島県側および和歌山県側では、非常に良い傾向の一致を示している。しかし、領域3では、1975年モデルとほとんど違いはなく、大阪湾沿岸域については近似の精度は悪いようである。

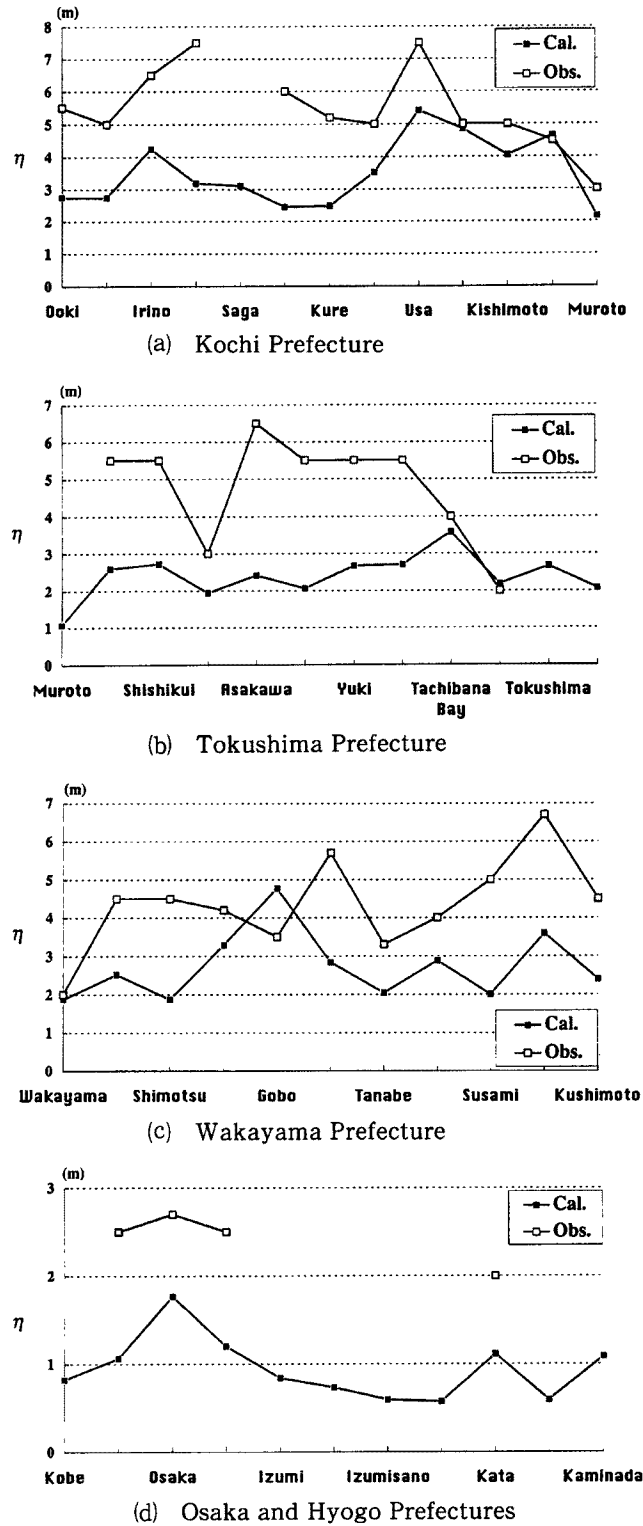


Fig. 9. Comparison between numerical results and field observation data due to the 1854 Ansei Nankaido earthquake tsunamis.

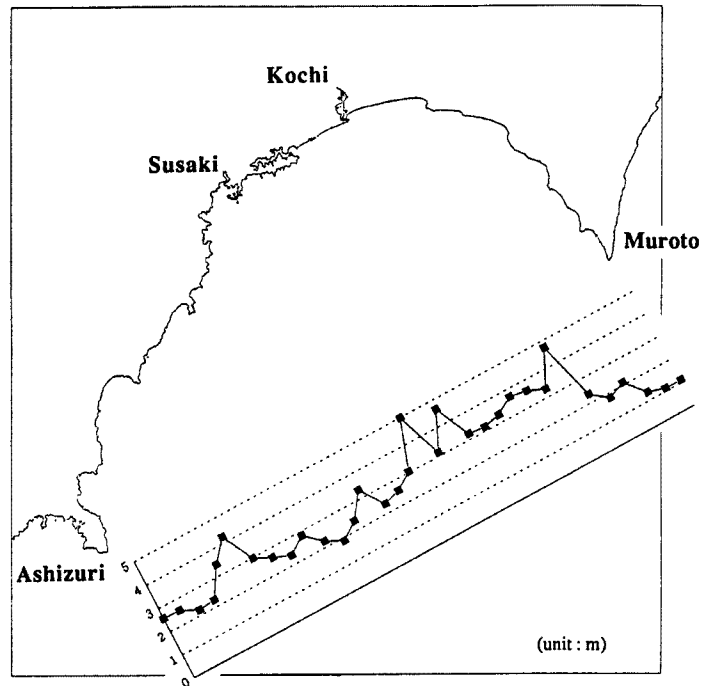


Fig. 10 (a). Spatial distribution of maximum water level due to the 1946 Nankai earthquake tsunamis given by numerical simulation around Tosa bay.

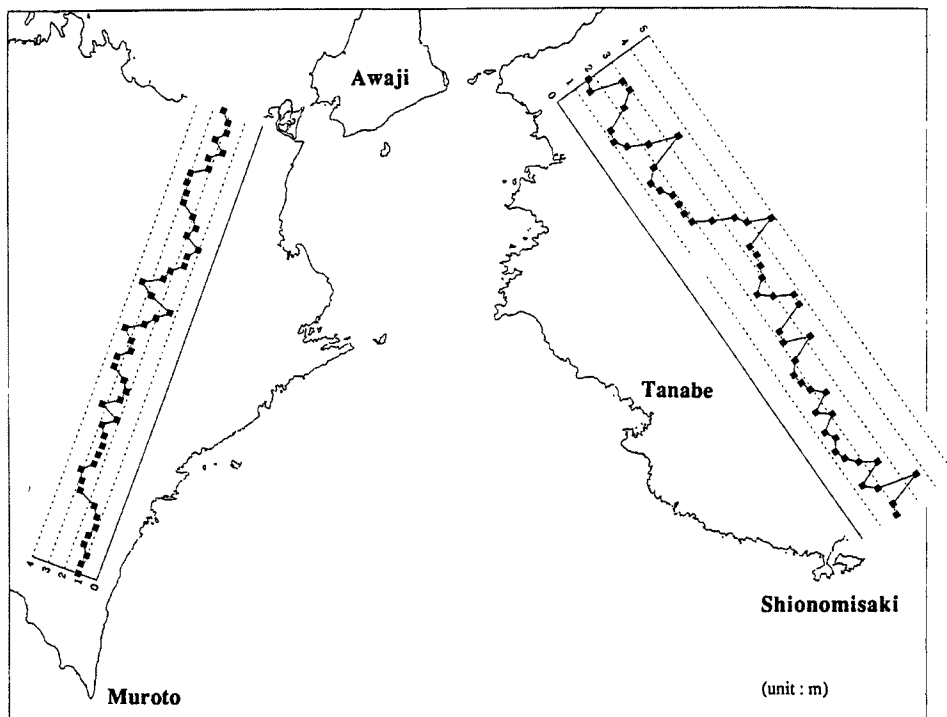


Fig. 10 (b). Spatial distribution of maximum water level due to the 1946 Nankai earthquake tsunamis given by numerical simulation around the Kii strait.

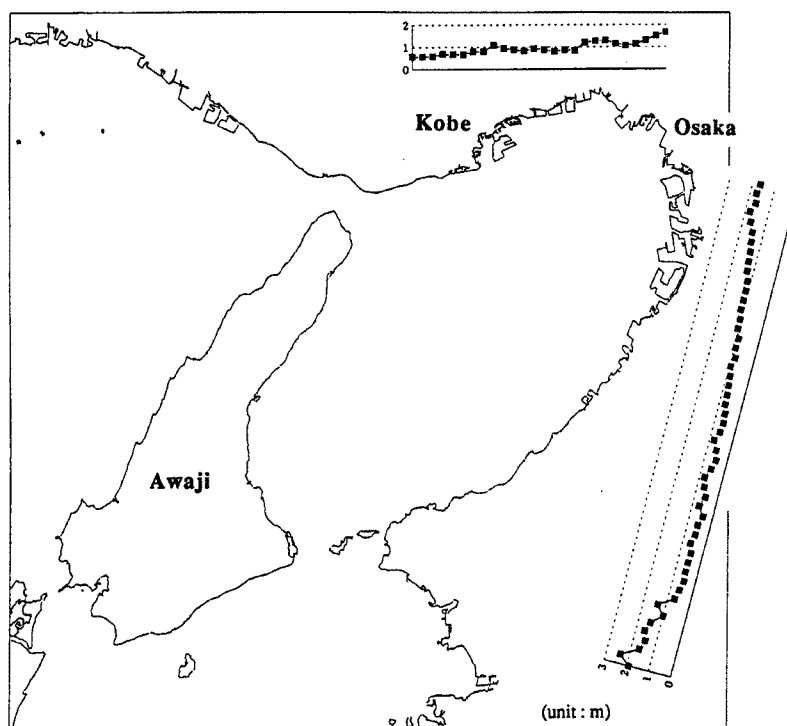


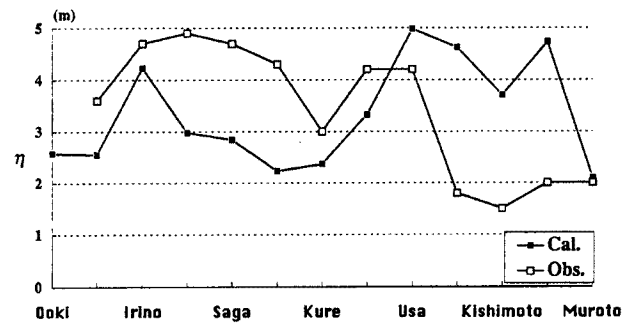
Fig. 10 (c). Spatial distribution of maximum water level due to the 1946 Nankai earthquake tsunamis given by numerical simulation around Osaka bay.

7. 断層モデルの移動による津波の伝播特性

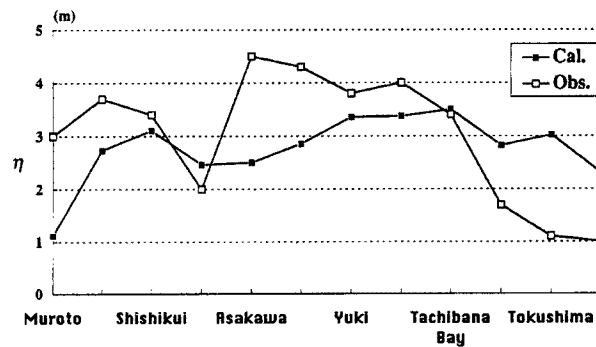
7.1 断層モデルの移動

地震津波の主要特性である水位および到達時間は、地震断層運動がどの位置で起こるか、すなわち波源域がどの位置にあるかによって、かなり変わってくる。したがって、歴史津波による外力の最大値が、起こりうる外力の最大値とは言い難い。また、地震の発生する位置によって、どの程度の津波が来襲するのか知っておくことは極めて重要である。このような観点から、本章では、地震断層モデルを南海トラフに沿って移動させて、それによる津波の伝播特性の地域分布を詳しく調べる。

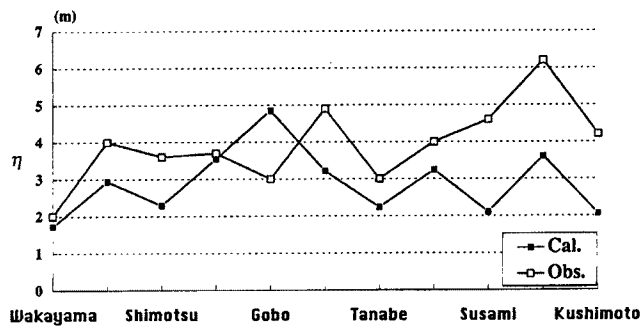
地震断層モデルを移動する際の断層パラメーターとしては、安政南海道地震（1854）の断層モデルである相田の Model 20' の断層パラメーターを用いた。そして、相田の Model 20' の断層の位置と安政南海地震の震央の位置との相対関係は変わらないと仮定して、震央と断層モデルを同時に南海トラフ沿いに 18ヶ所にわたって動かして、それによる津波の最短到達時間および最大水位の地域分布を調べた。移動した震央の位置（1～9, 11～19）を Fig. 13 に、また移動した断層モデル（Fault 1～Fault 9, Fault 11～Fault 19）の位置を Fig. 14 に表す。



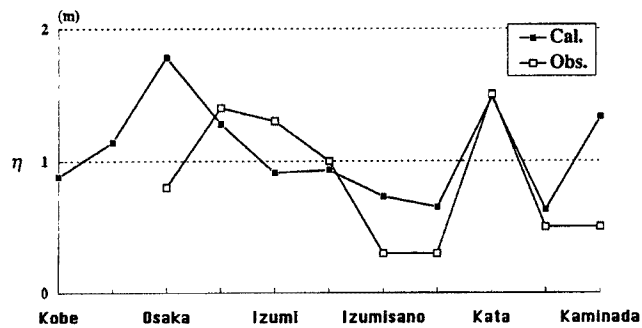
(a) Kochi Prefecture



(b) Tokushima Prefecture

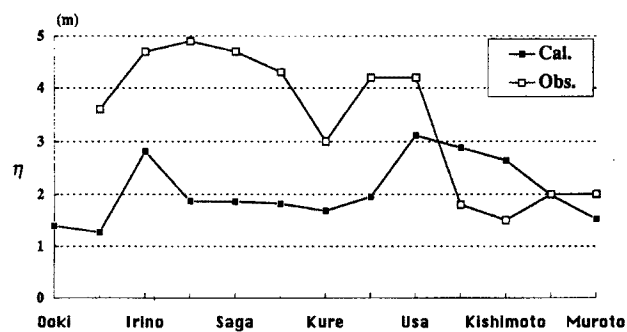


(c) Wakayama Prefecture

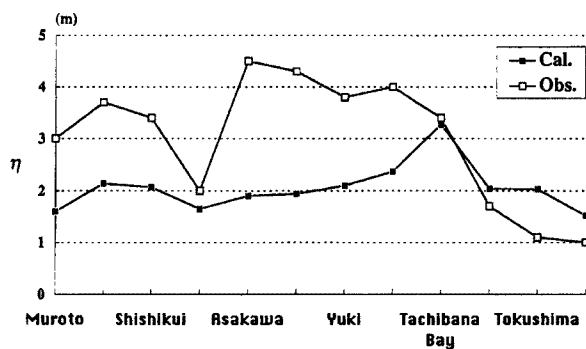


(d) Osaka and Hyogo Prefectures

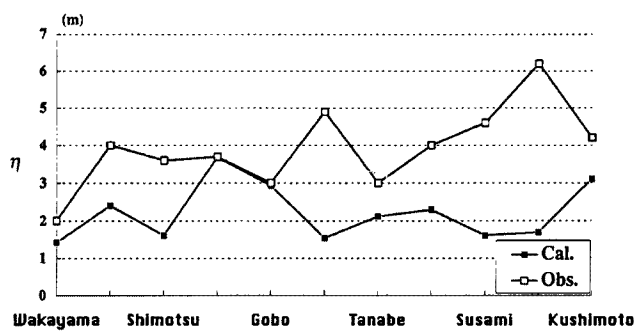
Fig. 11. Comparison between numerical results and field observation data due to the 1946 Nankai earthquake tsunamis (the fault model proposed by Ando (1975)).



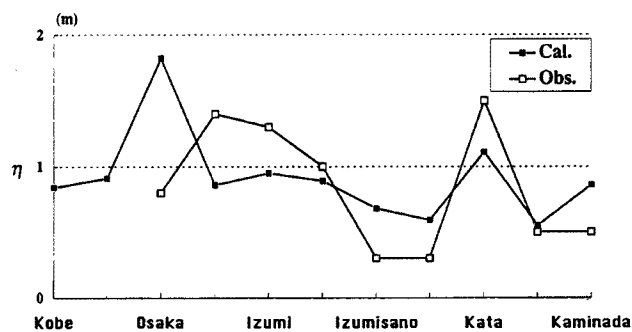
(a) Kochi Prefecture



(b) Tokushima Prefecture



(c) Wakayama Prefecture



(d) Osaka and Hyogo Prefectures

Fig. 12. Comparison between numerical results and field observation data due to the 1946 Nankai earthquake tsunamis (the fault model proposed by Ando (1982)).

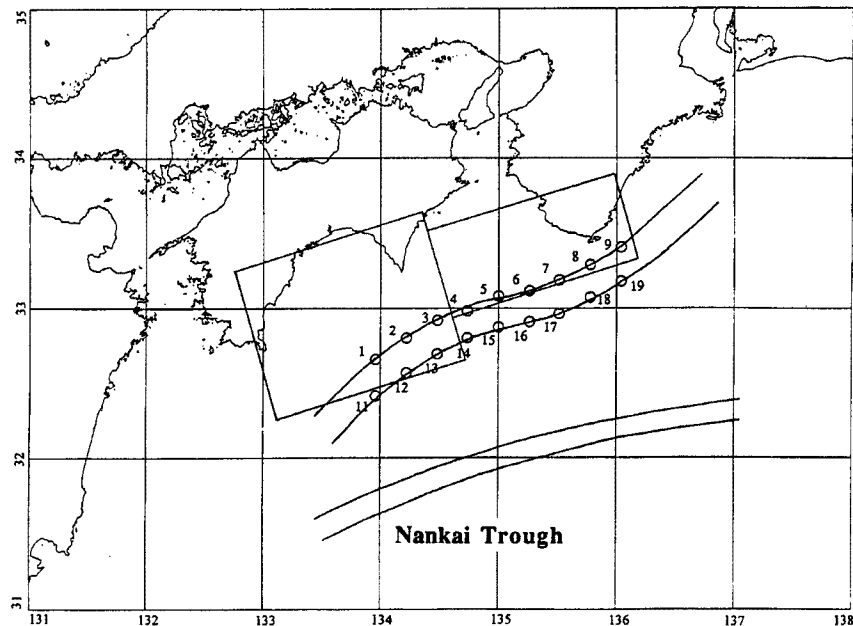


Fig. 13. Location of epicenter in numerical simulation.

7.2 最短到達時間の地域分布

各断層モデルにおける最短到達時間の地域分布を、Fig. 15 に表す。Fig. 15 から、各地の最短到達時間は、土佐湾沿岸域で 5 分～30 分程度、紀伊水道沿岸域で 5 分～60 分程度、友ヶ島水道付近で 60 分程度、大阪湾の湾奥で 120 分～150 分程度となることがわかる。土佐湾沿岸域では、Fault 1～5 および Fault 11～12 の位置に断層モデルがある場合に、到達時間が短くなる。一方、紀伊水道沿岸域では、断層モデルの位置による極端な差は認められない。徳島県の橋湾より南の地域および和歌山県の御坊以南の地域では、断層モデルがどの位置にあってもほぼ 20 分以内には津波が到着することがわかる。

さらに、最短到達時間を 10 分以内、10～20 分、20 分以上の 3 種類に分けて、各地域の最短到達時間がそのどれにあてはまるか表したものが、Fig. 16 である。例えば、Fig. 16 において、室戸の周辺地域は 10 分以内と 10～20 分のところに斜線が引いてあるが、これはこの地域では断層モデルの位置により、最短到達時間が 10 分以内となる場合と 10～20 分となる場合があることを示している。このように 10 分単位で津波の最短到達時間を区切った理由は、以下のとおりである。10 分以内の場合は、津波警報を聞いてから避難したのでは間に合わない場合、つまり自主防災が必要となる場合である。10～20 分の場合は、津波警報を聞いてから避難しても何とか間に合うが、避難の仕方に不備がある場合には被災する可能性が高い場合である。したがって、この場合には、従来の警報伝達・避難体制に加えて、自主防災が必要となる。20 分以上の場合は、従来の警報伝達・避難体制で避難しても、安全に避難できると考えられる場合である。このような理由から、最短到達時間を上記の 3 種類に区別した。Fig. 16 を見ると、津波に対して、どの地域でどのような避難体制をとる必要があるのかがよくわかるであろう。

7.3 最大水位の地域分布

各断層モデルにおける最大水位の地域分布を、Fig. 17 に表す。また、断層モデルの移動により求められた最大水位の地域分布を Fig. 18 に表す。つまり、Fig. 18 は、津波によって起こりうる水位の最大値の地域分布を表している。現在の港湾施設の設計条件は、外力として主に台風、風波および高潮を対象としているが、Fig. 18 を見ると津波外力に対しても検討を行う必要があると言える。

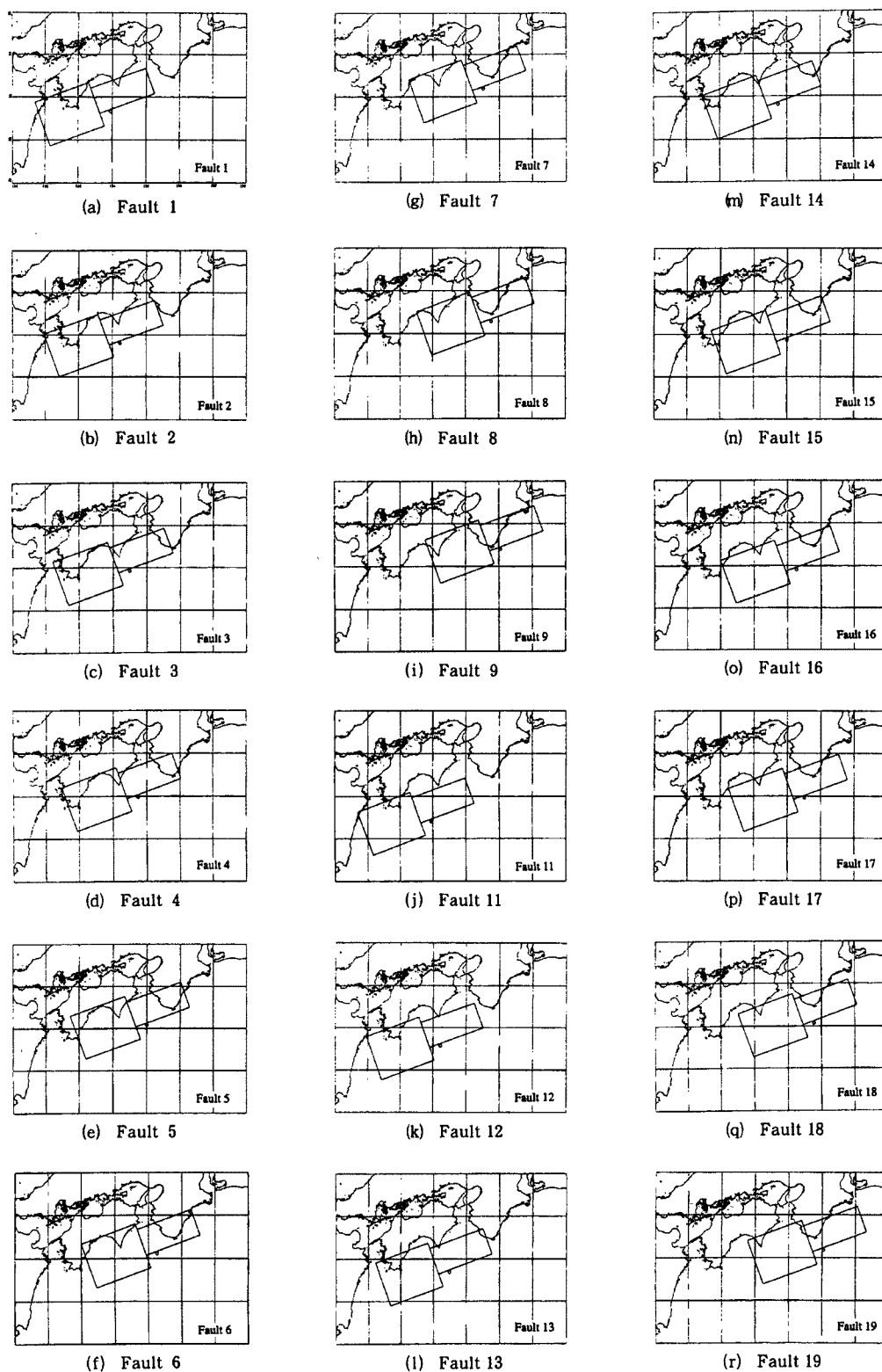


Fig. 14. Location of fault model in numerical simulation.

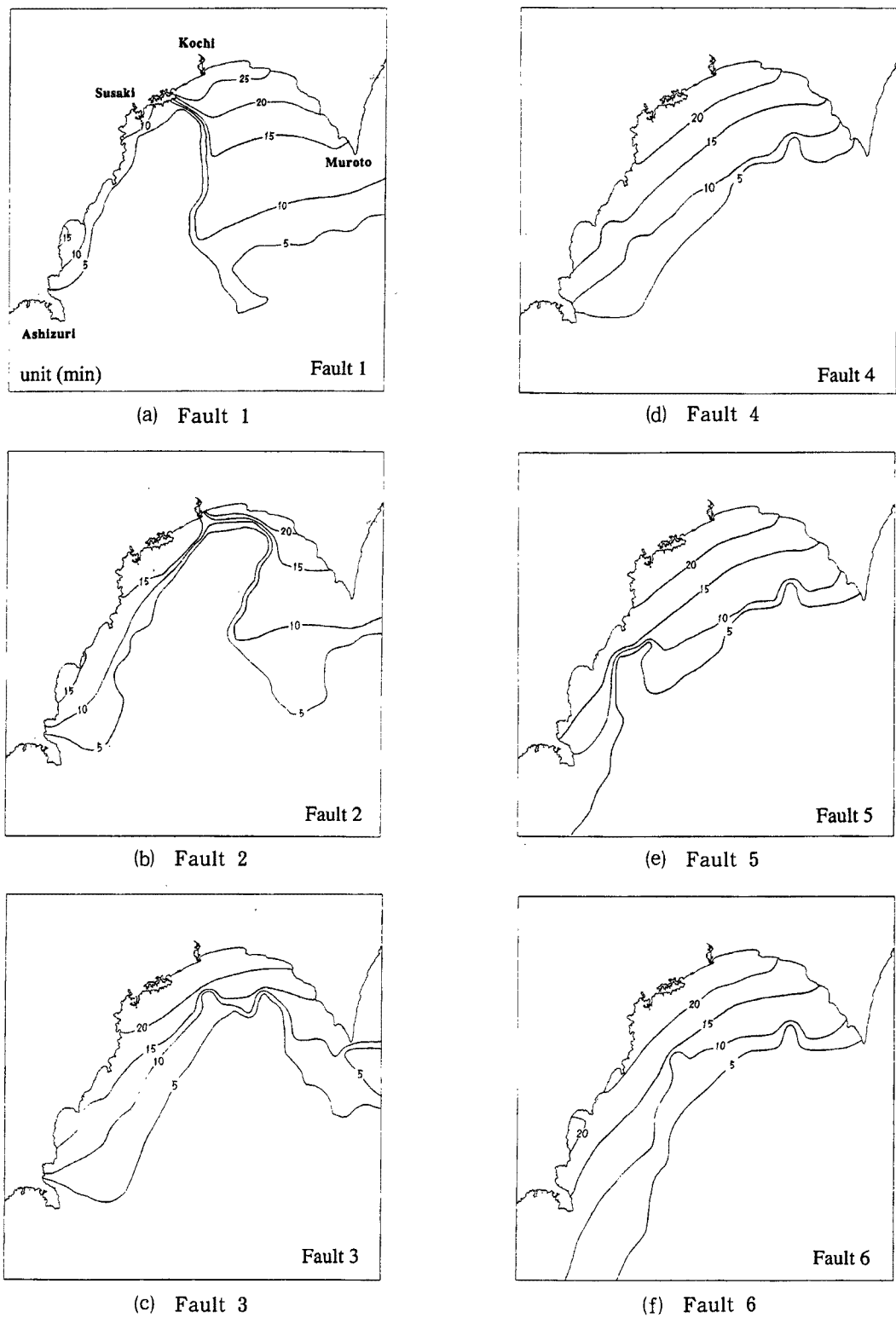
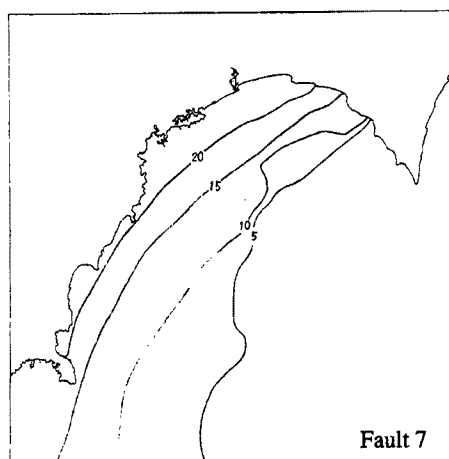
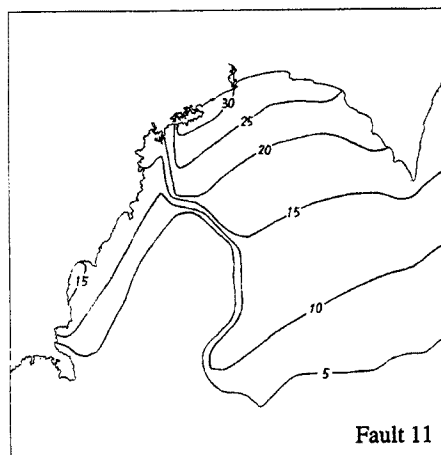


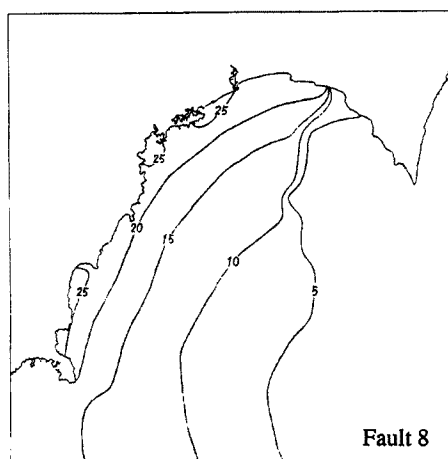
Fig. 15-1. Spatial distribution of the minimum arrival time of tsunamis with the changes of location of fault model around Tosa bay.



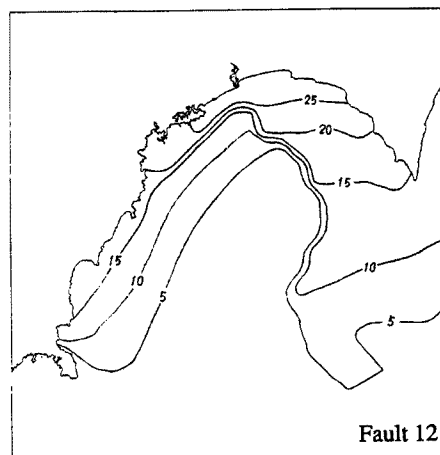
(g) Fault 7



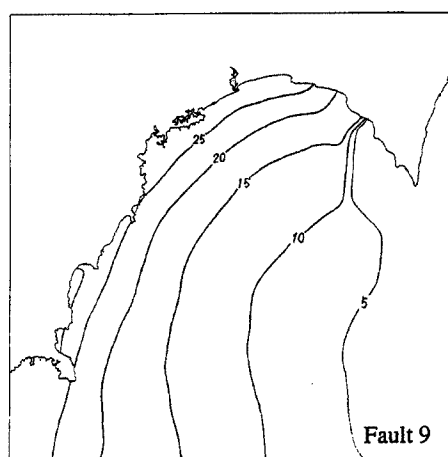
(j) Fault 11



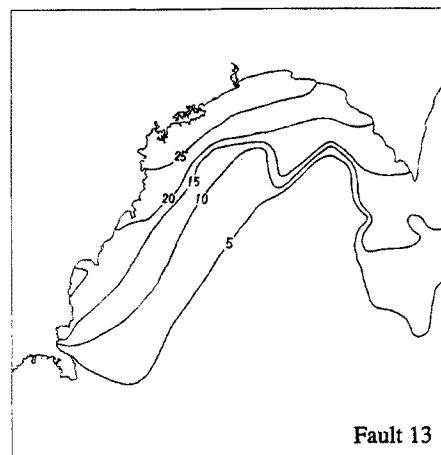
(h) Fault 8



(k) Fault 12

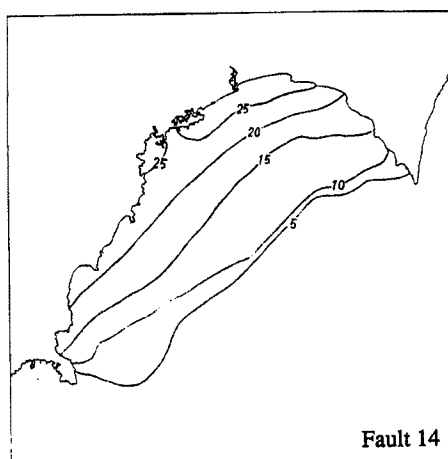


(i) Fault 9

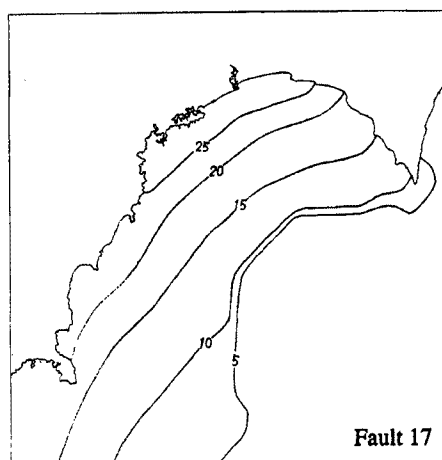


(l) Fault 13

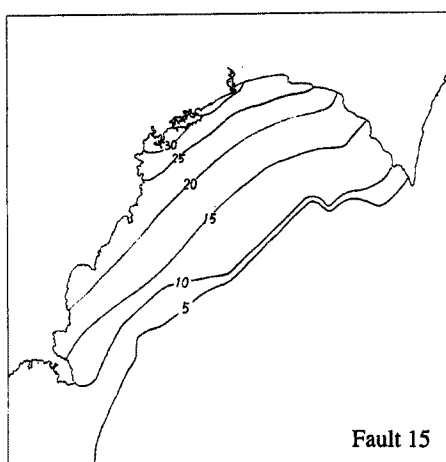
Fig. 15-1. (continued.)



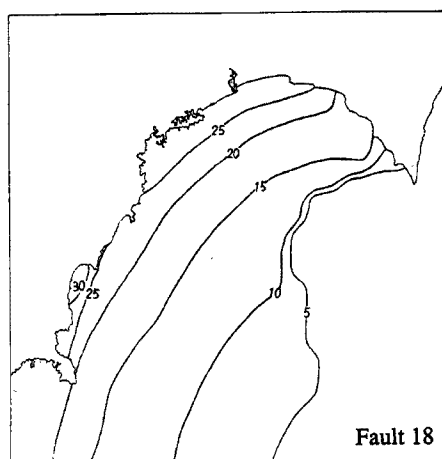
(m) Fault 14



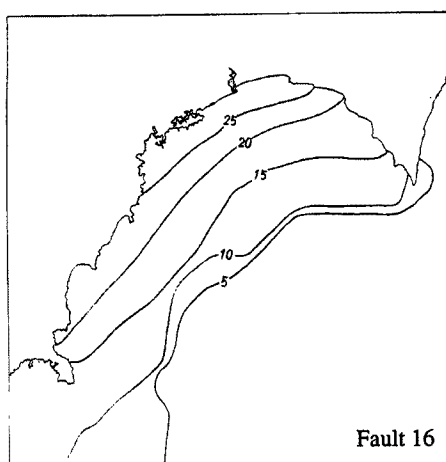
(p) Fault 17



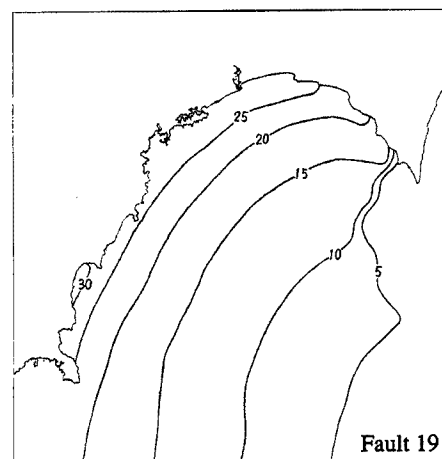
(n) Fault 15



(q) Fault 18



(o) Fault 16



(r) Fault 19

Fig. 15-1. (continued.)

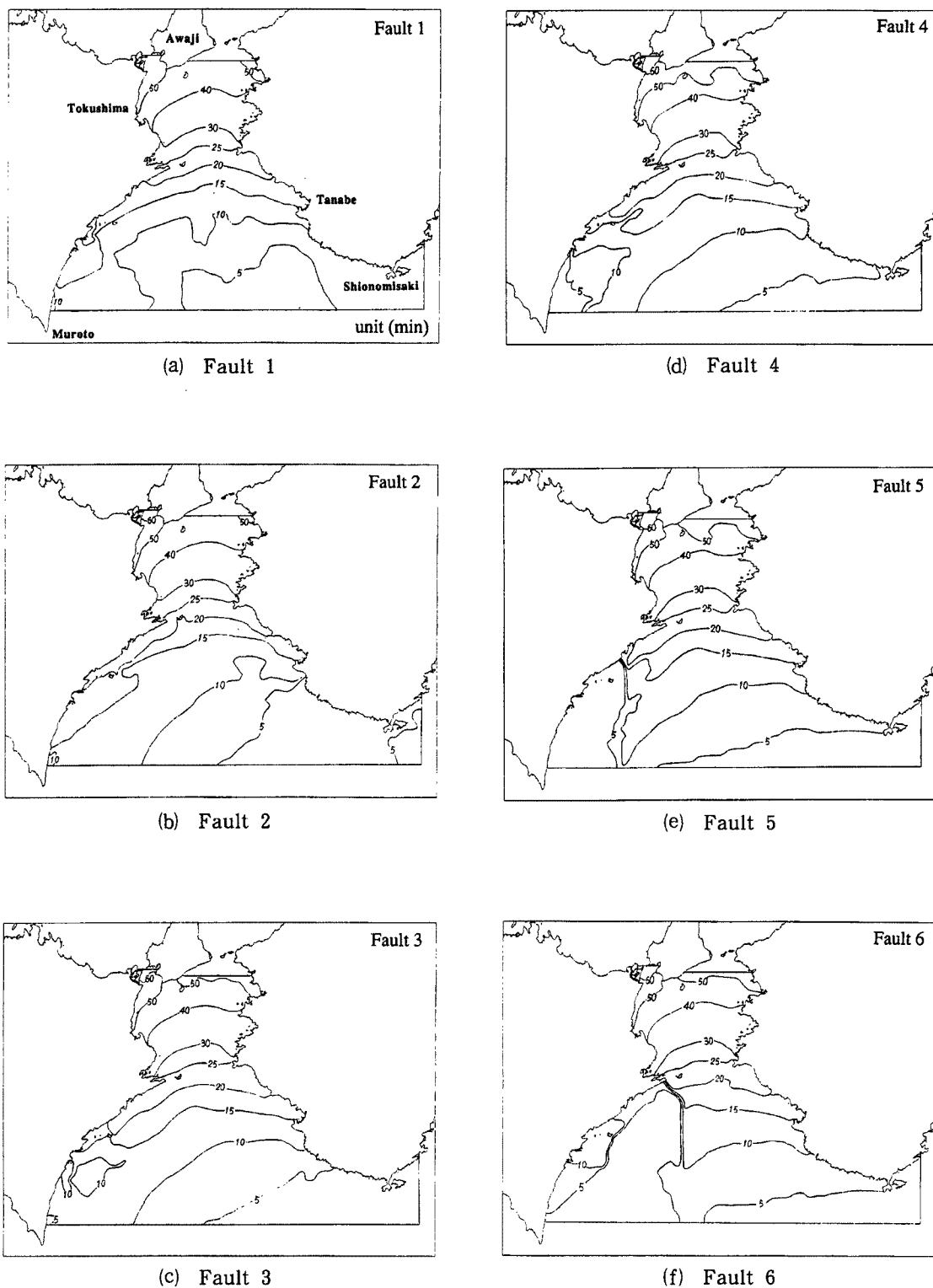
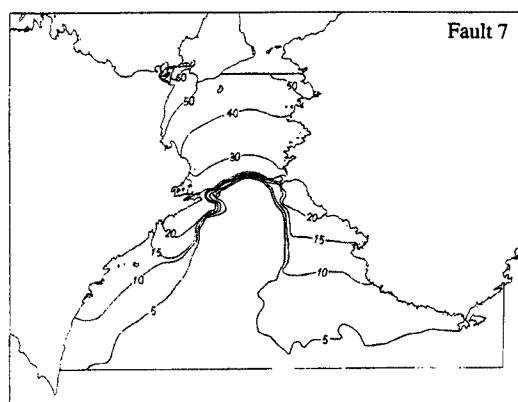
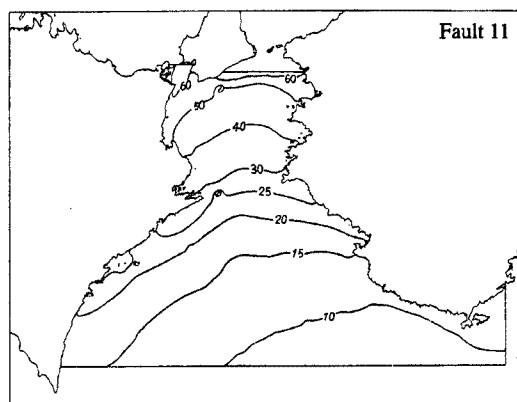


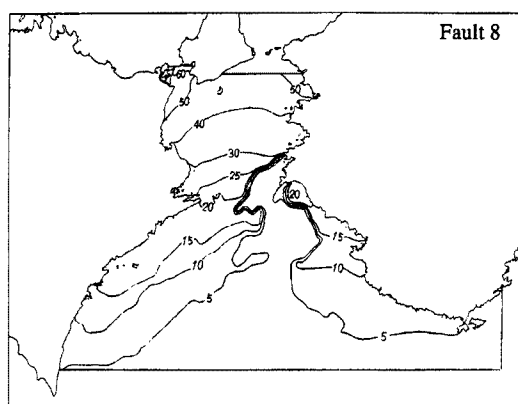
Fig. 15-2. Spatial distribution of the minimum arrival time of tsunamis with the changes of location of fault model around the Kii strait.



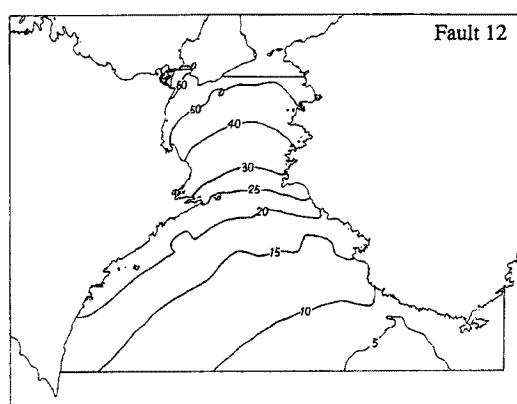
(g) Fault 7



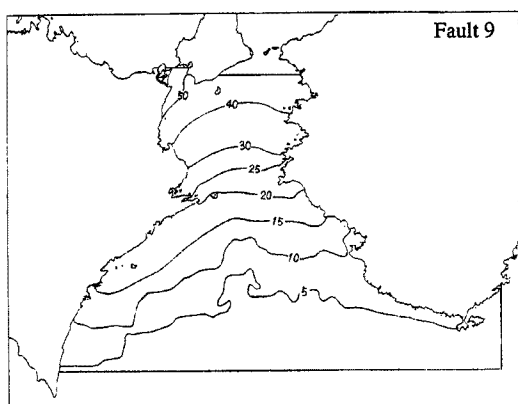
(j) Fault 11



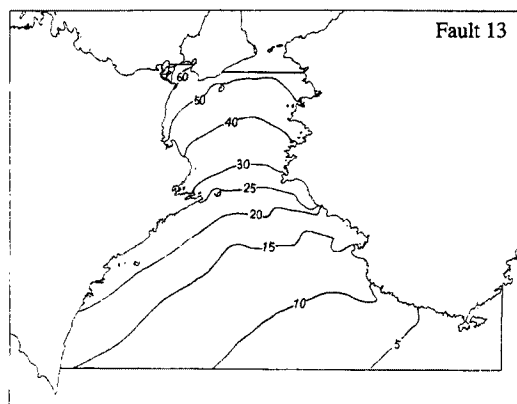
(h) Fault 8



(k) Fault 12

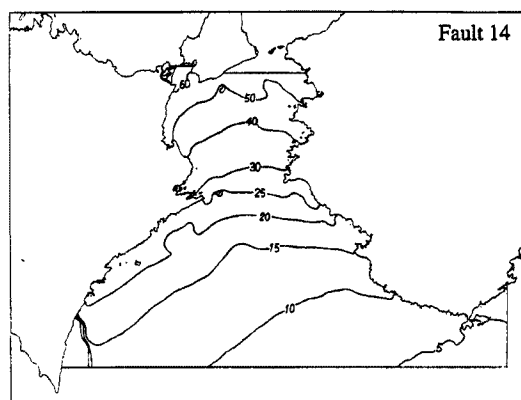


(i) Fault 9

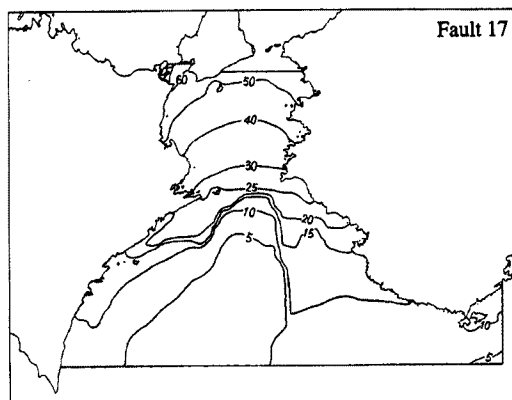


(l) Fault 13

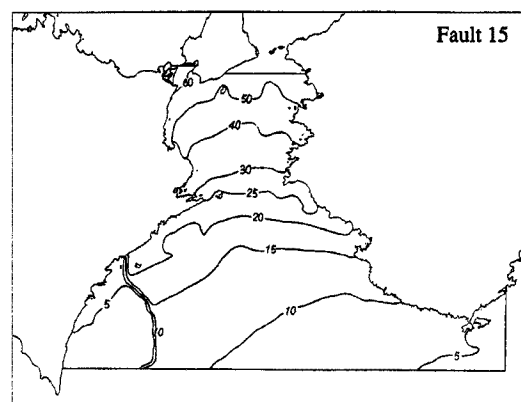
Fig. 15-2. (continued.)



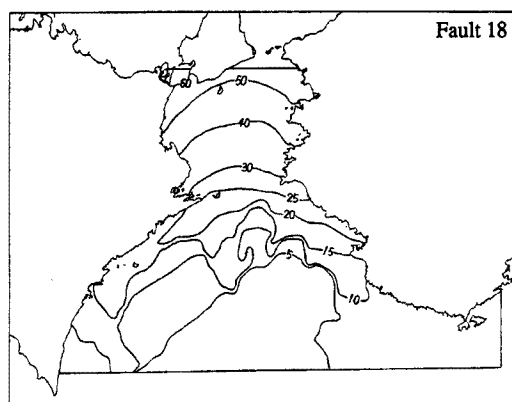
(m) Fault 14



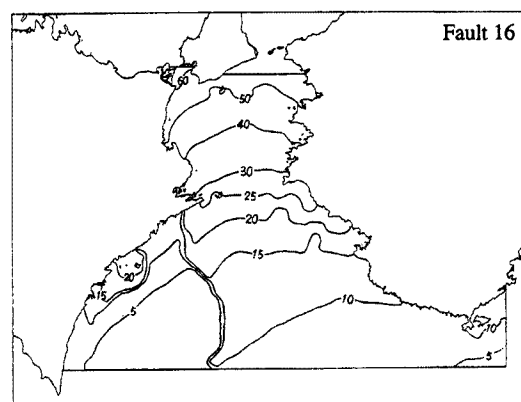
(p) Fault 17



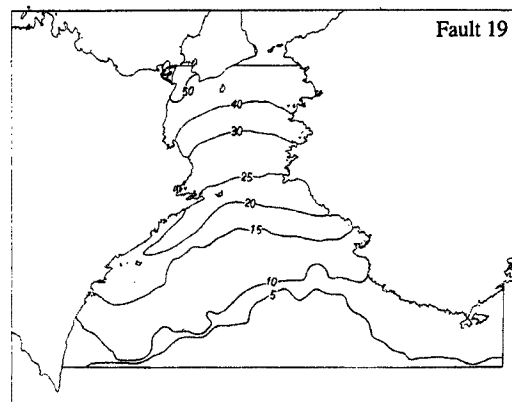
(n) Fault 15



(q) Fault 18



(o) Fault 16



(r) Fault 19

Fig. 15-2. (continued.)

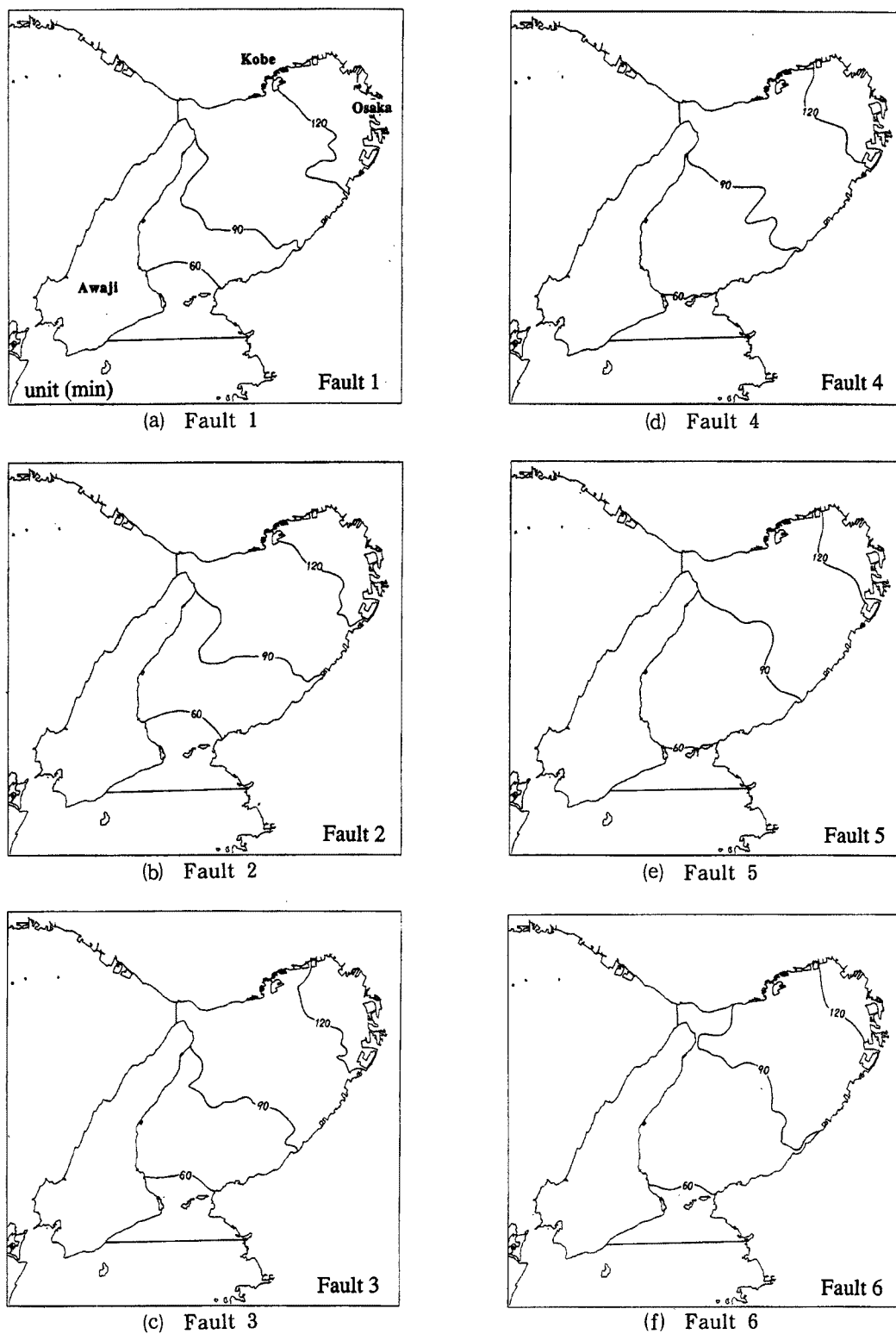
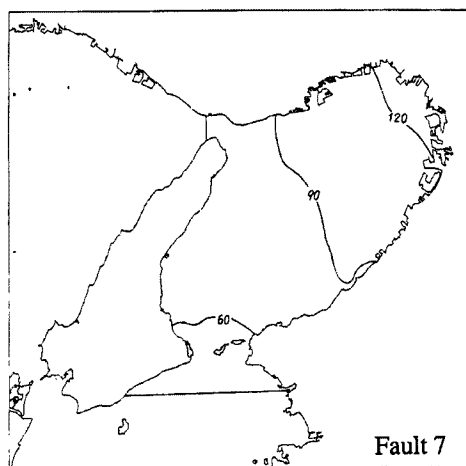
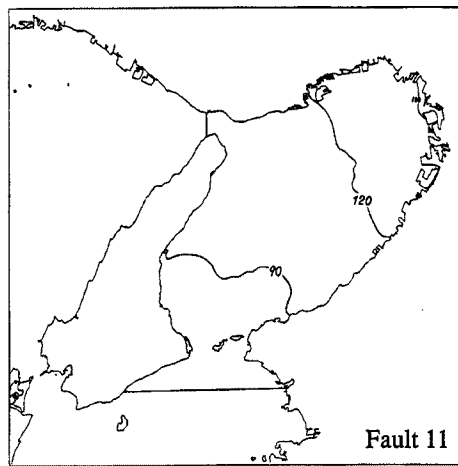


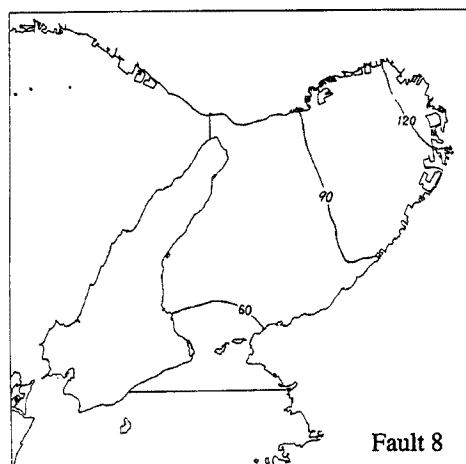
Fig. 15-3. Spatial distribution of the minimum arrival time of tsunamis with the changes of location of fault model around Osaka bay.



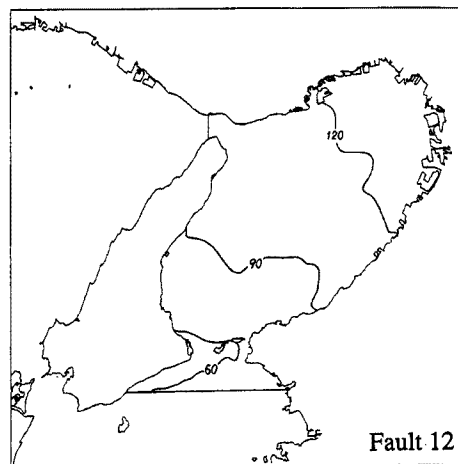
(g) Fault 7



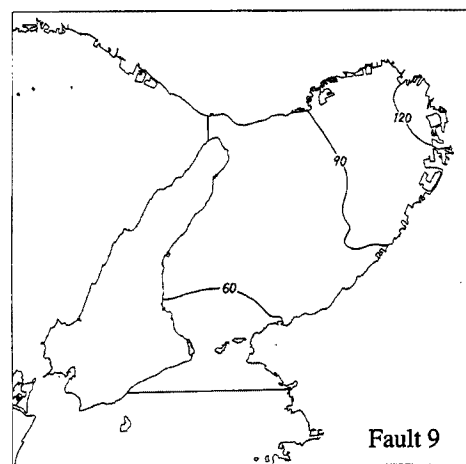
(j) Fault 11



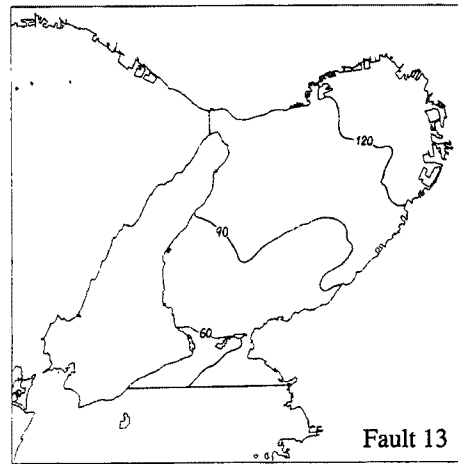
(h) Fault 8



(k) Fault 12

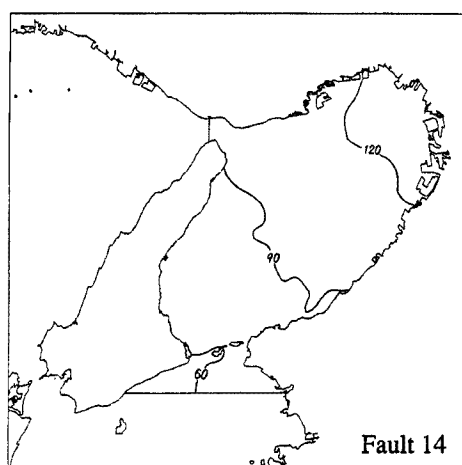


(i) Fault 9

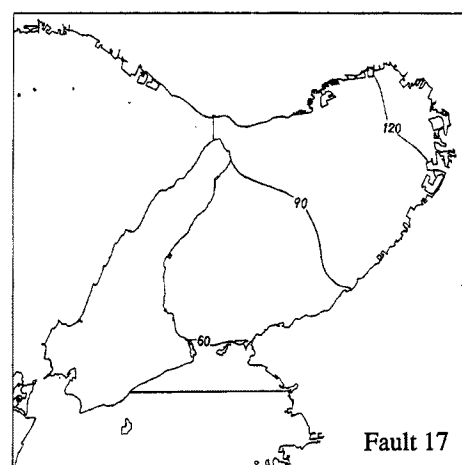


(l) Fault 13

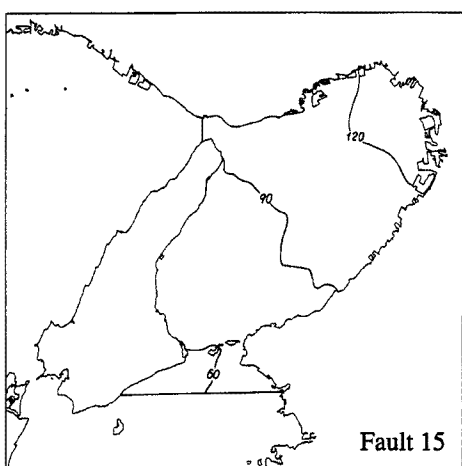
Fig. 15-3. (continued.)



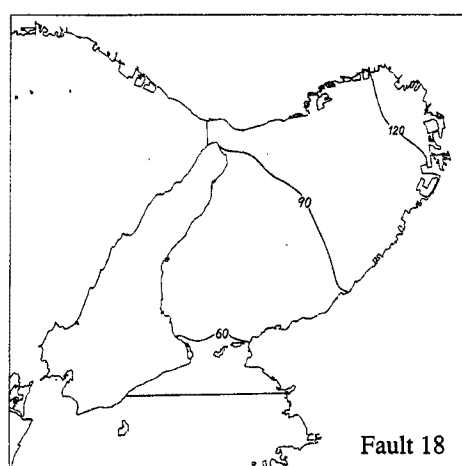
(m) Fault 14



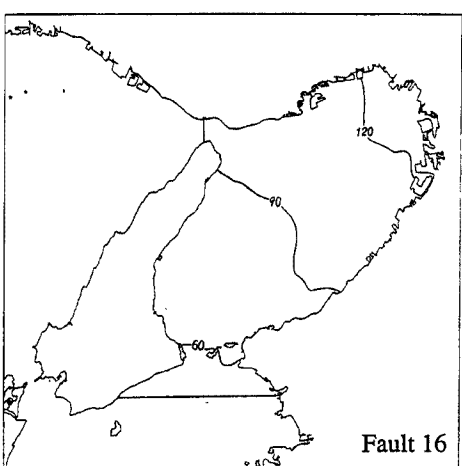
(p) Fault 17



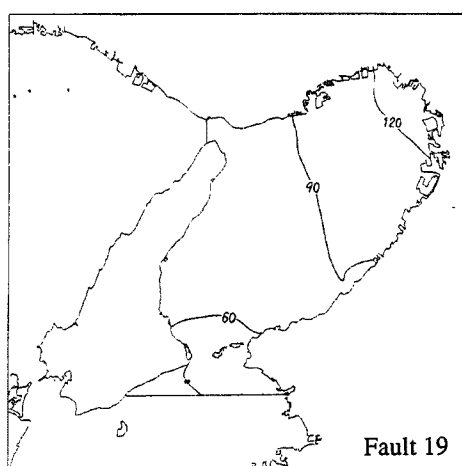
(n) Fault 15



(q) Fault 18



(o) Fault 16



(r) Fault 19

Fig. 15-3. (continued.)

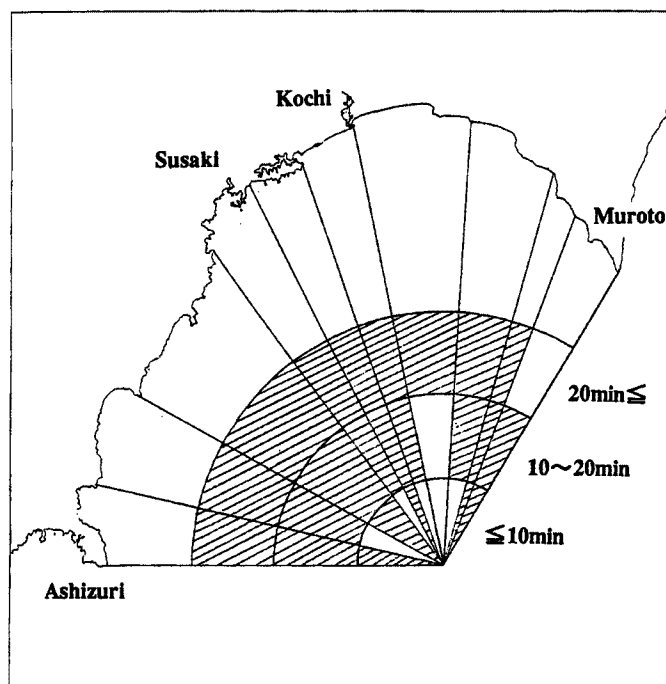


Fig. 16 (a). Spatial distribution of the minimum arrival time of tsunamis around Tosa bay.

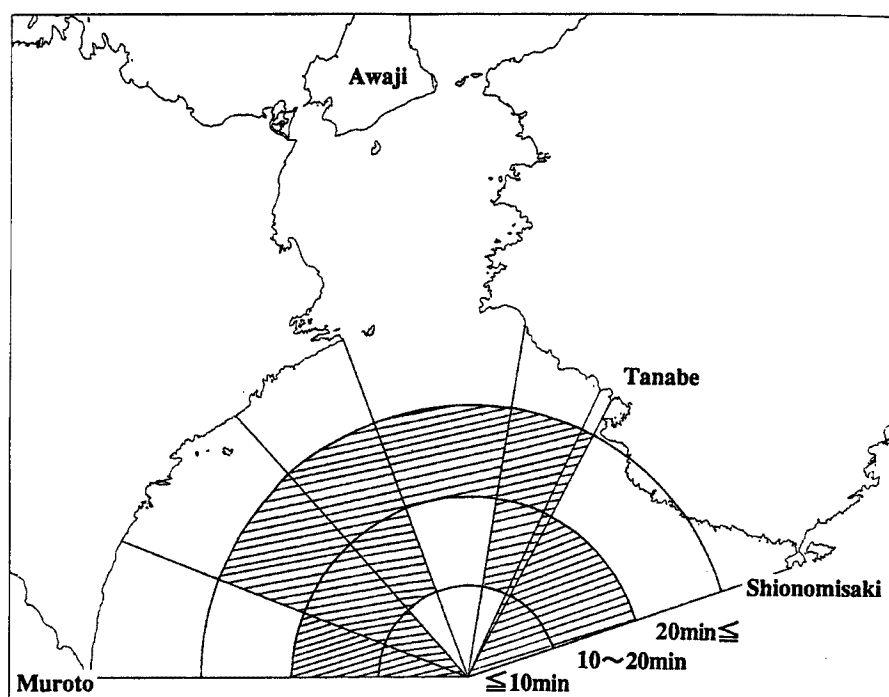


Fig. 16 (b). Spatial distribution of the minimum arrival time of tsunamis around the Kii strait.

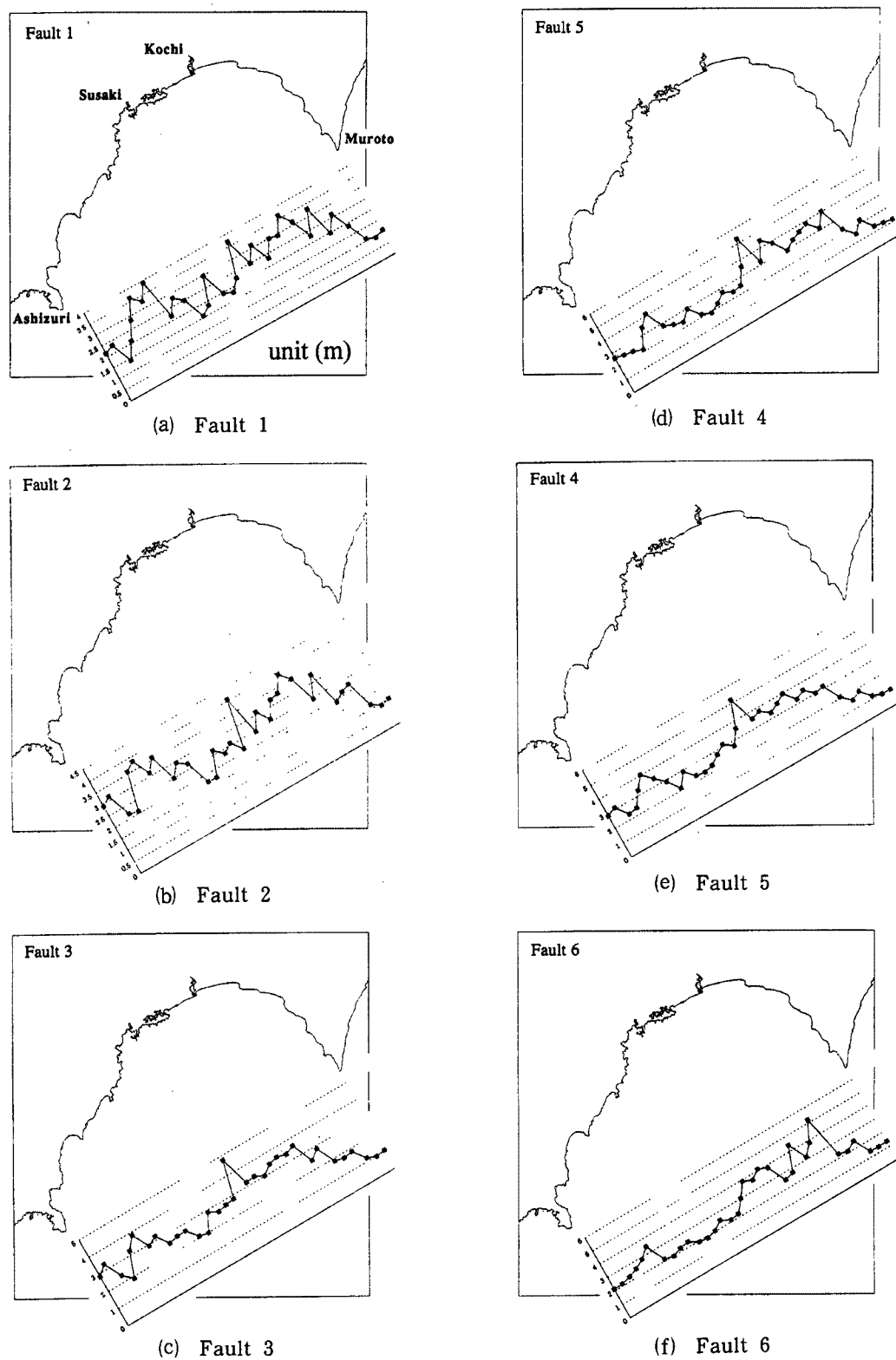
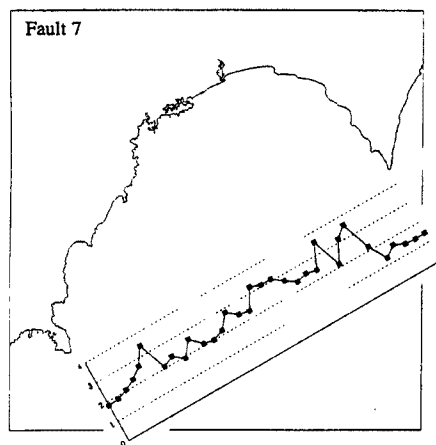
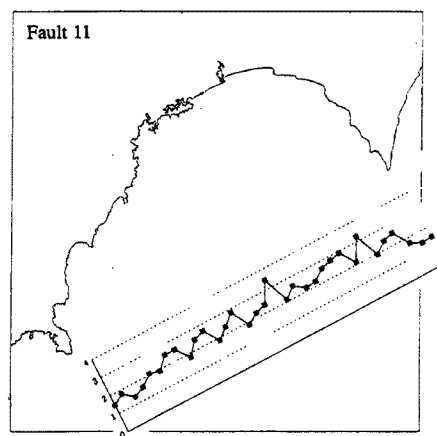


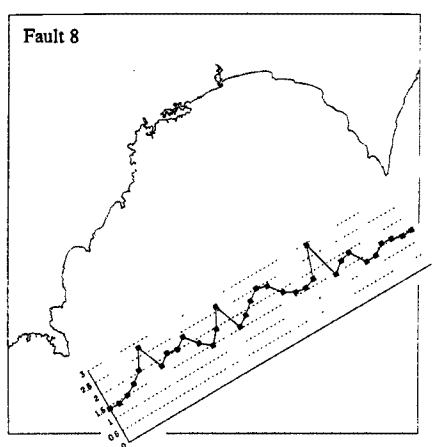
Fig. 17-1. Spatial distribution of the maximum water level of tsunamis with the changes of location of fault model around Tosa bay.



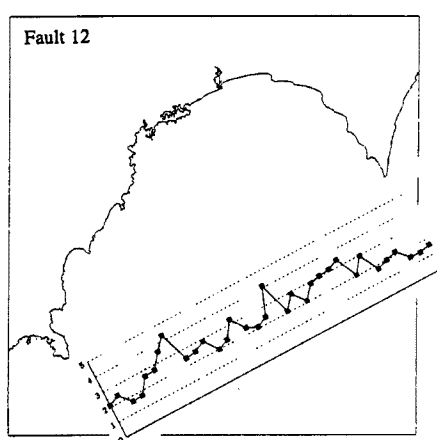
(g) Fault 7



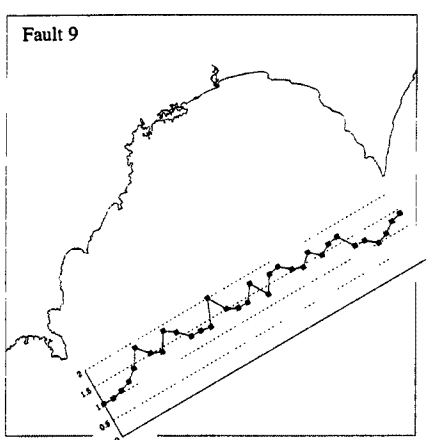
(j) Fault 11



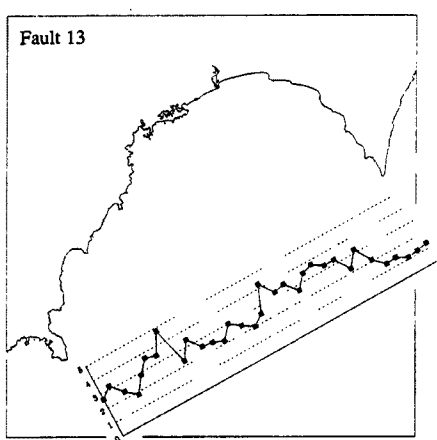
(h) Fault 8



(k) Fault 12

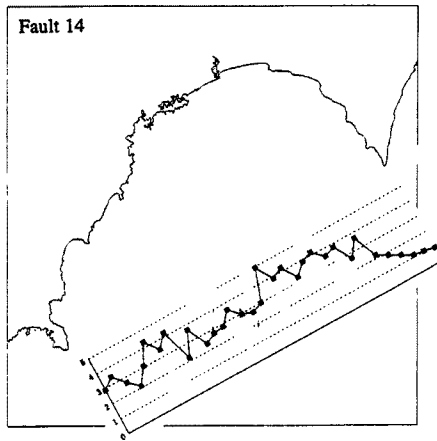


(i) Fault 9

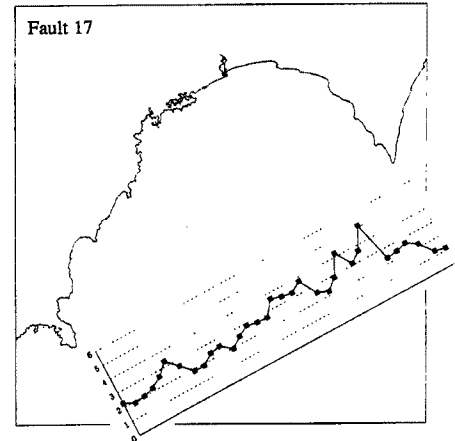


(l) Fault 13

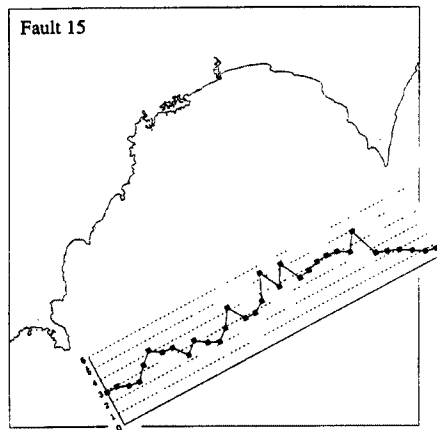
Fig. 17-1. (continued.)



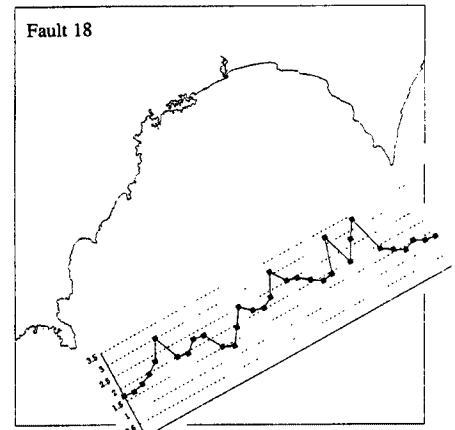
(m) Fault 14



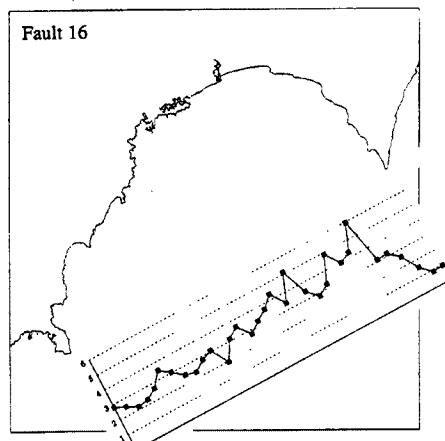
(p) Fault 17



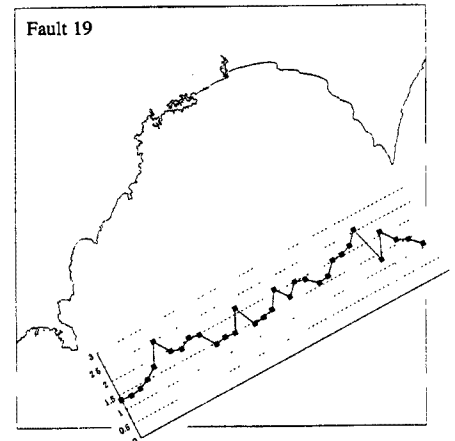
(n) Fault 15



(q) Fault 18



(o) Fault 16



(r) Fault 19

Fig. 17-1. (continued.)

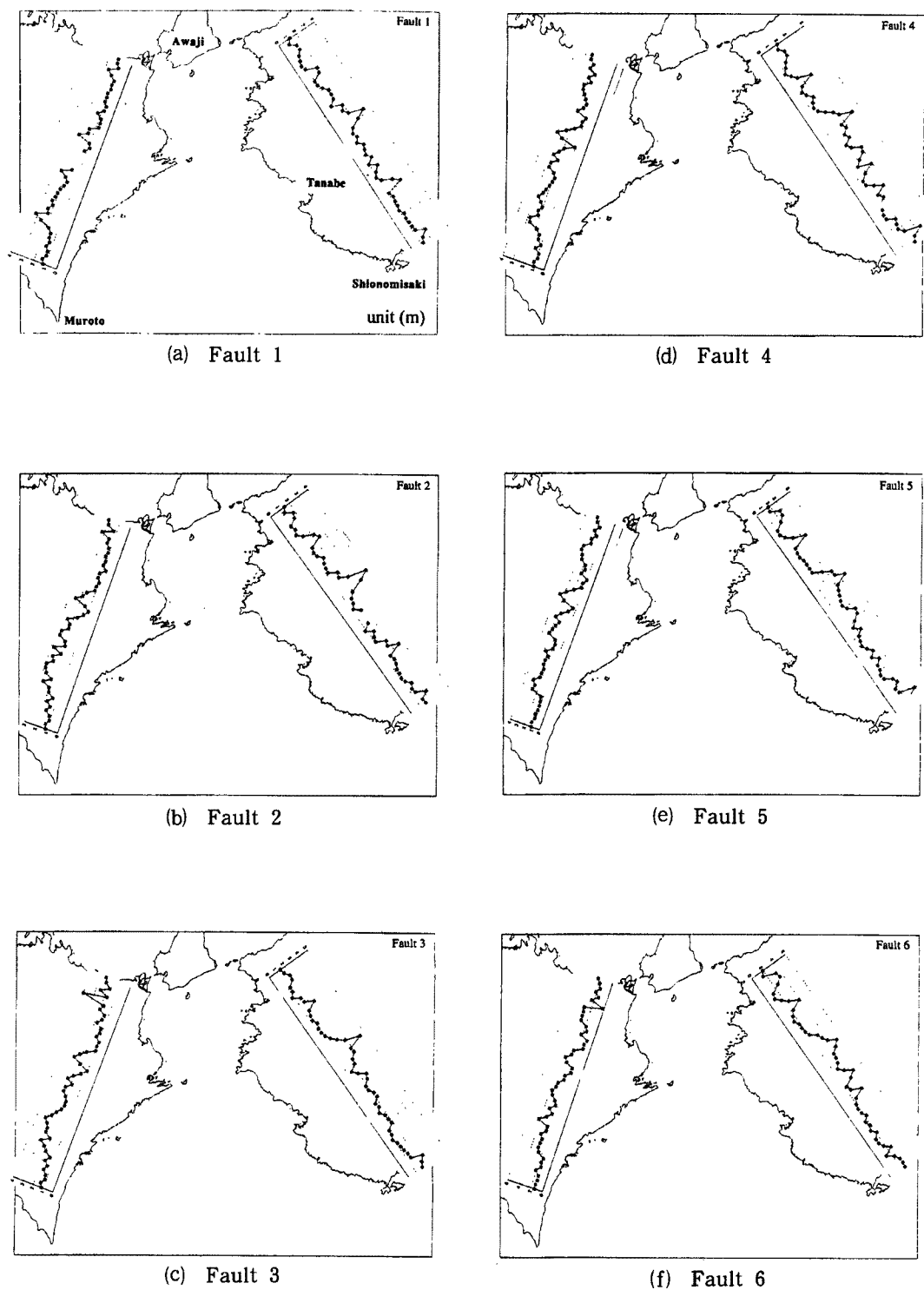
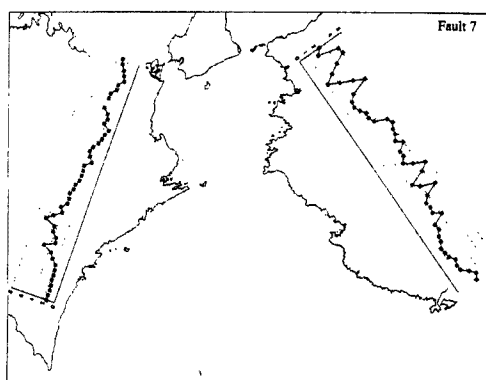
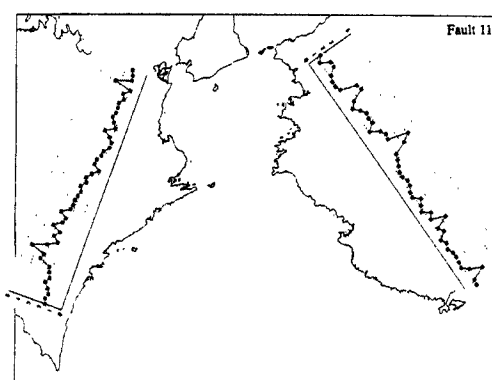


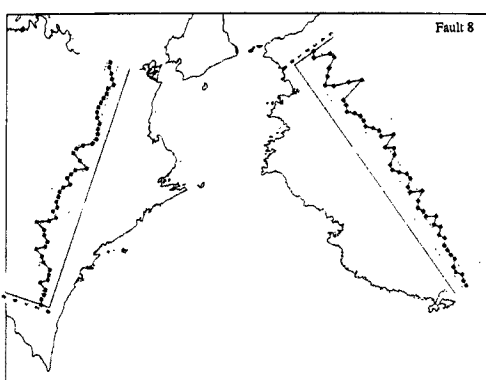
Fig. 17-2. Spatial distribution of the maximum water level of tsunamis with the changes of location of fault model around the Kii strait.



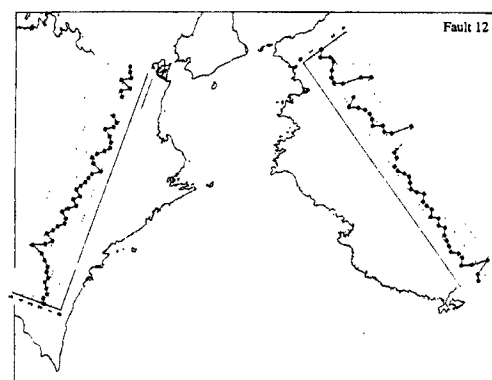
(g) Fault 7



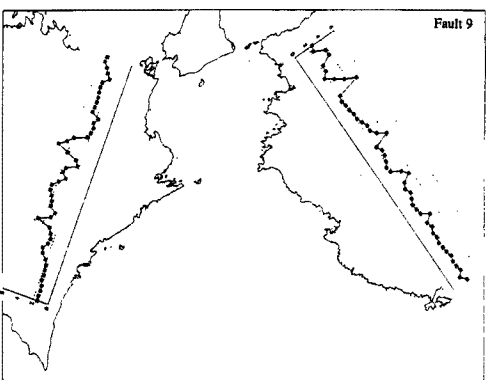
(j) Fault 11



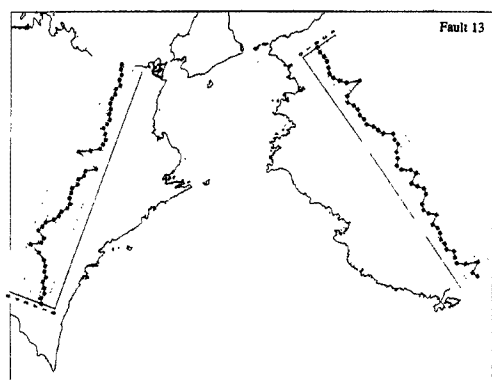
(h) Fault 8



(k) Fault 12

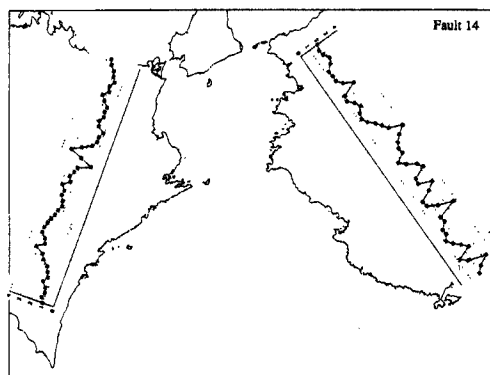


(i) Fault 9

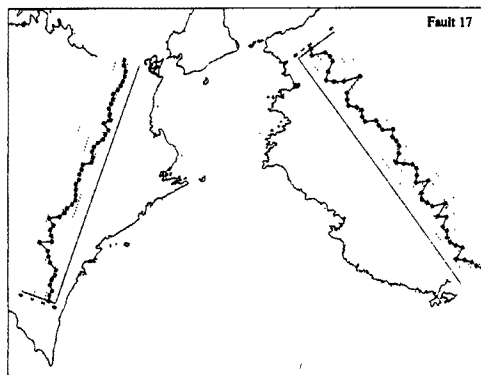


(l) Fault 13

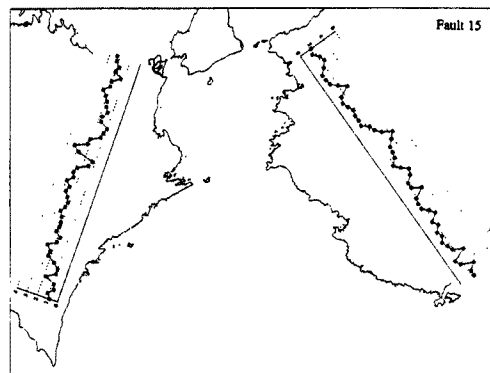
Fig. 17-2. (continued.)



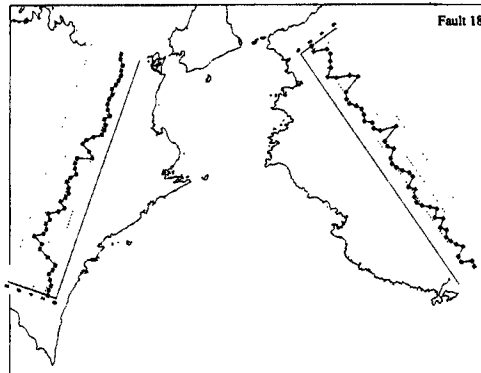
(m) Fault 14



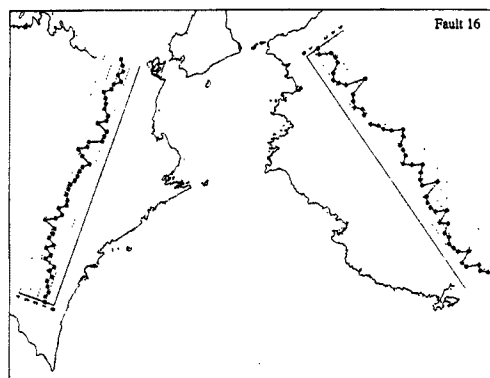
(p) Fault 17



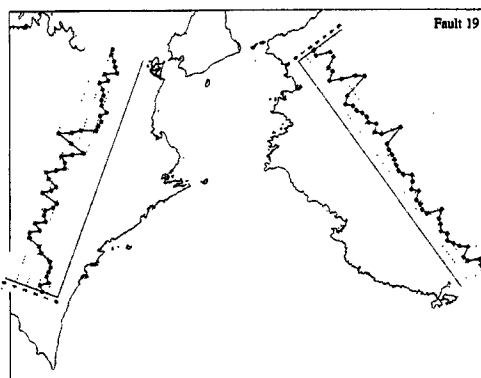
(n) Fault 15



(q) Fault 18



(o) Fault 16



(r) Fault 19

Fig. 17-2. (continued.)

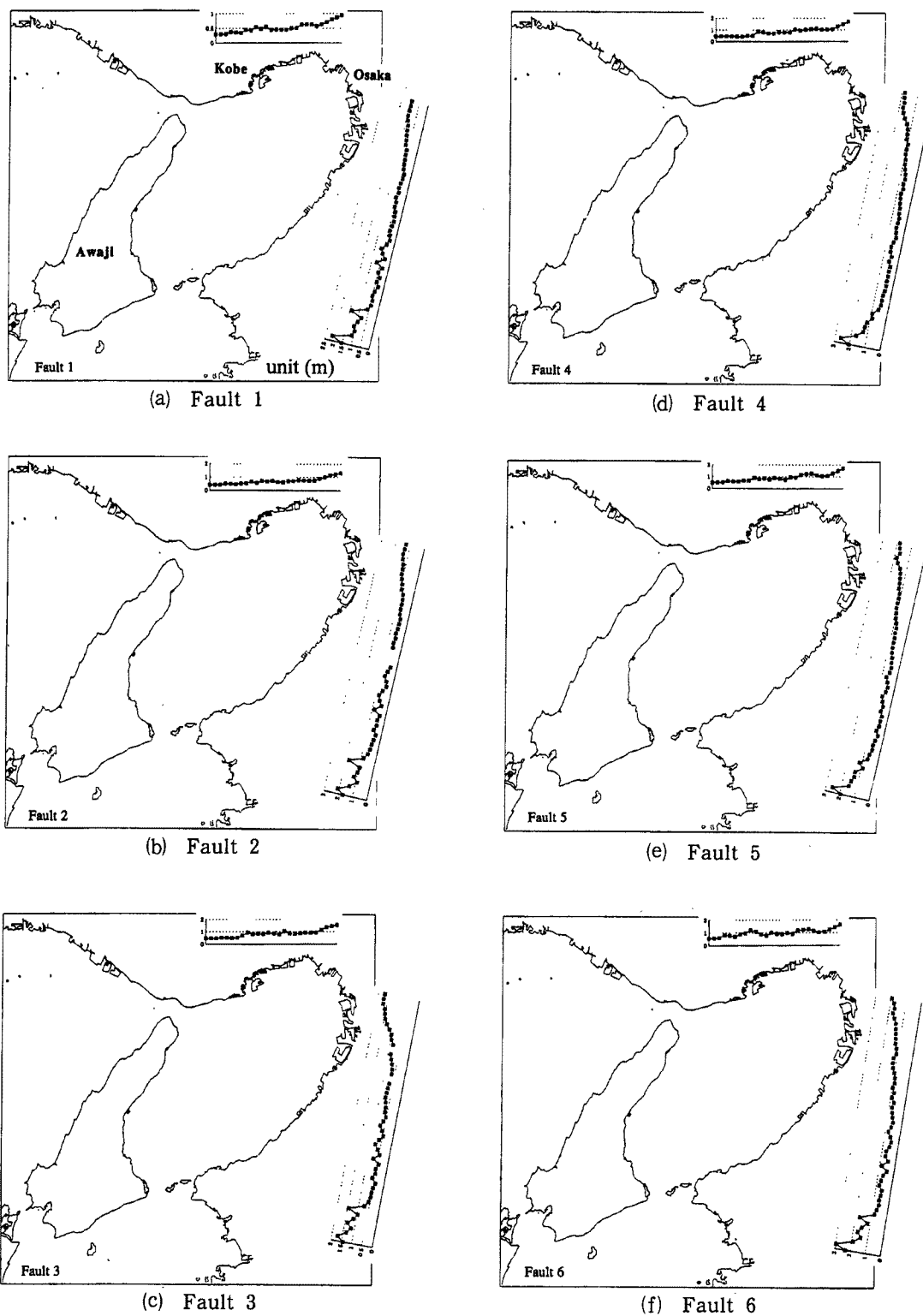


Fig. 17-3. Spatial distribution of the maximum water level of tsunamis with the changes of location of fault model around Osaka bay.

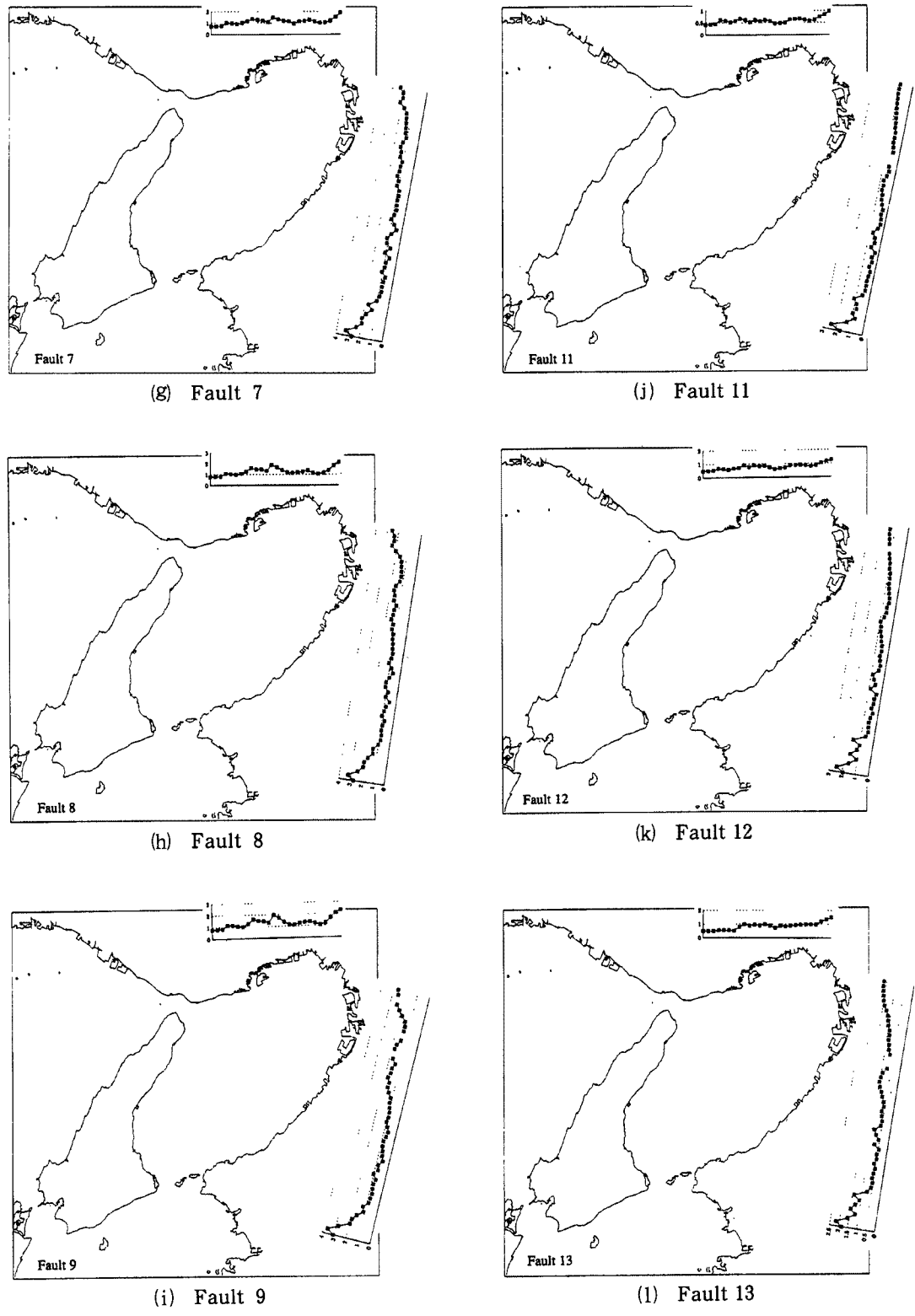
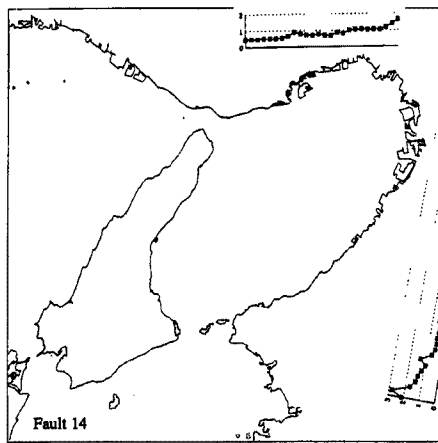
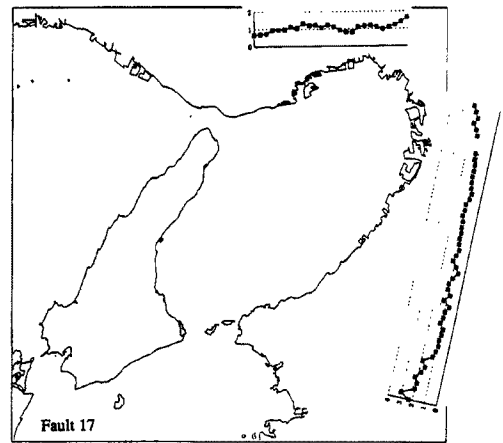


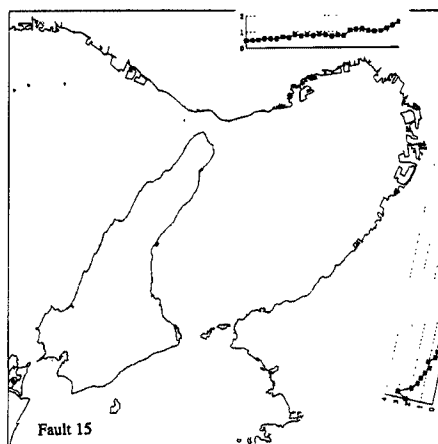
Fig. 17-3. (continued.)



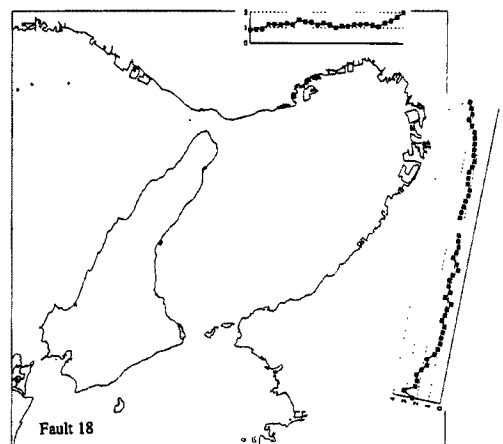
(m) Fault 14



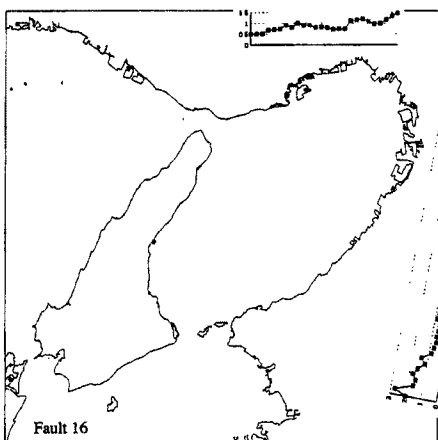
(p) Fault 17



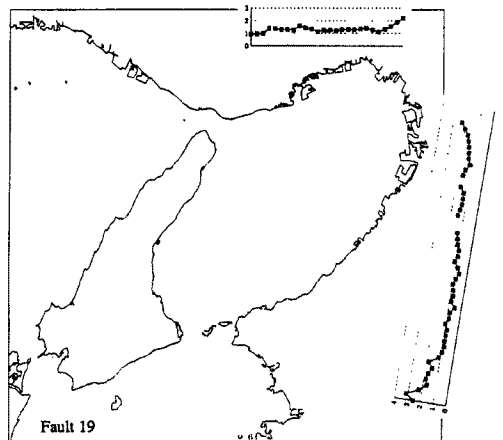
(n) Fault 15



(q) Fault 18



(o) Fault 16



(r) Fault 19

Fig. 17-3. (continued.)

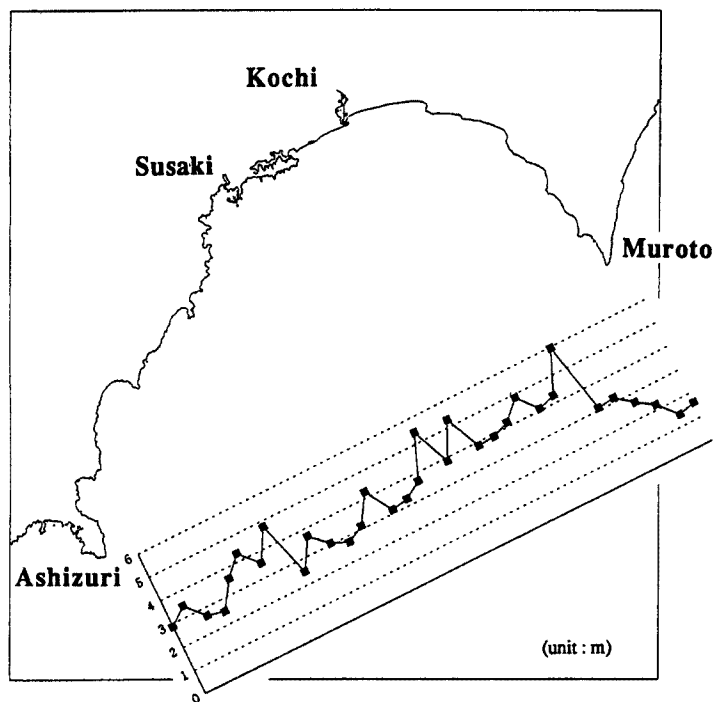


Fig. 18 (a). Spatial distribution of the maximum water level of tsunamis around Tosa bay.

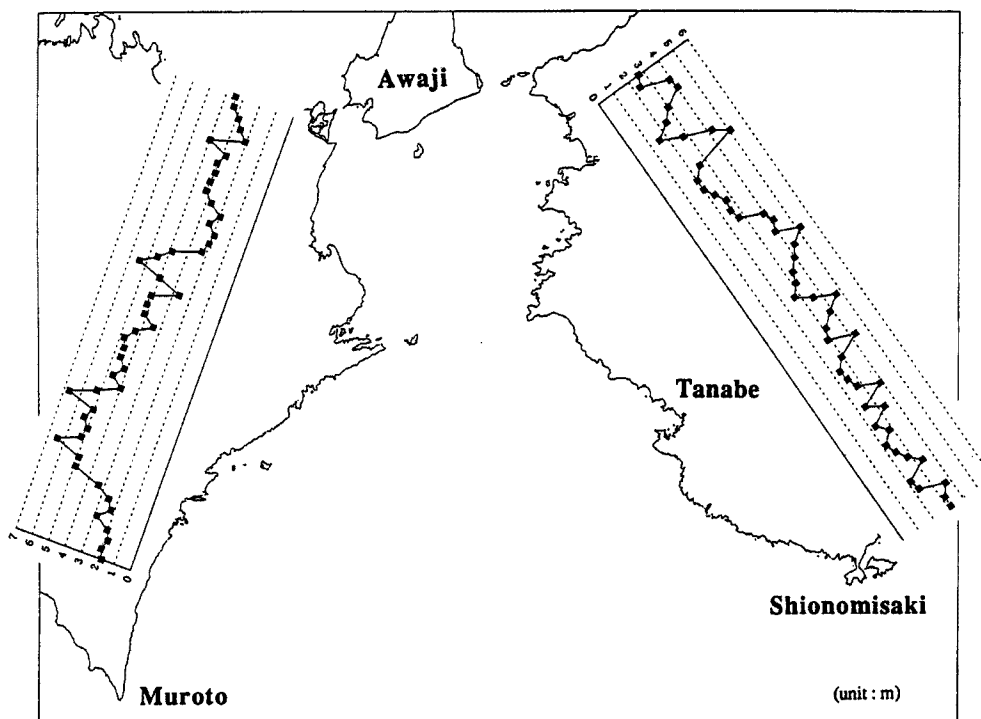


Fig. 18 (b). Spatial distribution of the maximum water level of tsunamis around the Kii strait.

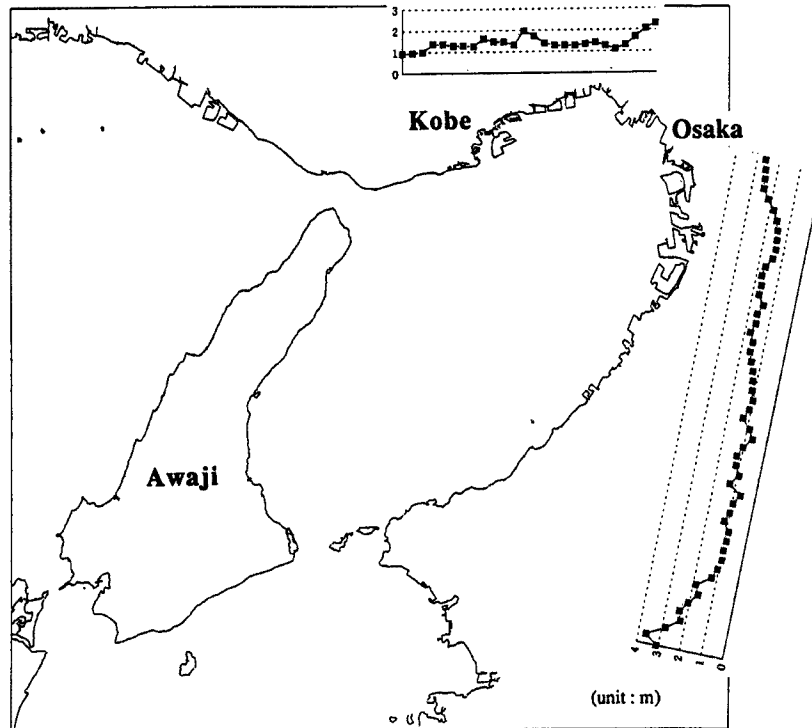


Fig. 18(c). Spatial distribution of the maximum water level of tsunamis around Osaka bay.

さらに、断層モデルの位置によって最大水位がどのように変わるのか、特定の地点について求めたものを、Fig. 19 に表す。安政南海道津波（1854）および南海津波（1946）の断層モデルの位置は、ほぼ Fault 5 および Fault 15 の位置と同じであるから、これらの位置を基準にして Fig. 19 を見ると、土佐湾沿岸域では、だいたいこれらの位置を頂点とした凸型の分布をしており、過去に発生した津波による水位を起こりうる最大の水位とみなすことができる。ところが、徳島県沿岸部、とくに甲浦、浅川および牟岐では、Fault 7～Fault 9 および Fault 17～Fault 19 で最大水位が急上昇している。また、和歌山県沿岸部でも断層モデルの位置が東へ移動するほど水位が大きくなる傾向がある。この傾向は、大阪にも見られる。したがって、これらの地域では、将来津波が発生した場合に、その位置によっては過去の津波による最大水位よりも大きな水位に襲われる可能性があり、その危険度は高いと言える。

ところで、Table 3 は最大水位が第何波目で現れるかを表にしたものである。また、Fig. 20 は第 1 波目の水位が断層モデルの位置によってどのように変わるかを図に表したものである。これらを見ると、外力の最大値が現れる時間は断層モデルの位置および津波来襲地域によってまったく異なった様相を呈しており、外力を評価する際にはその出現時間も考慮する必要があると言えるだろう。

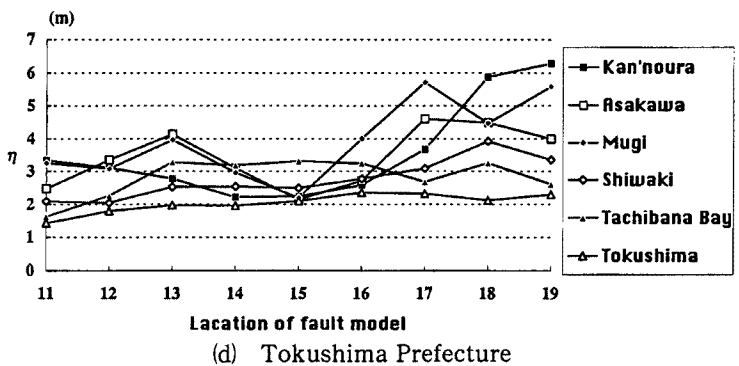
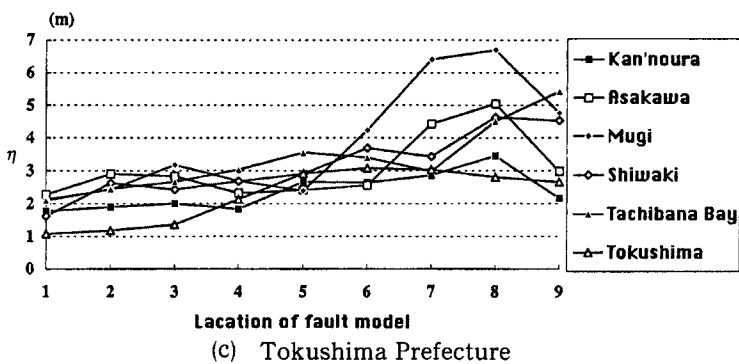
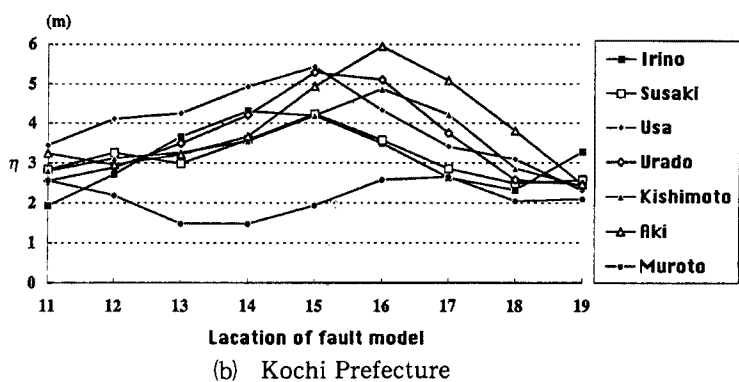
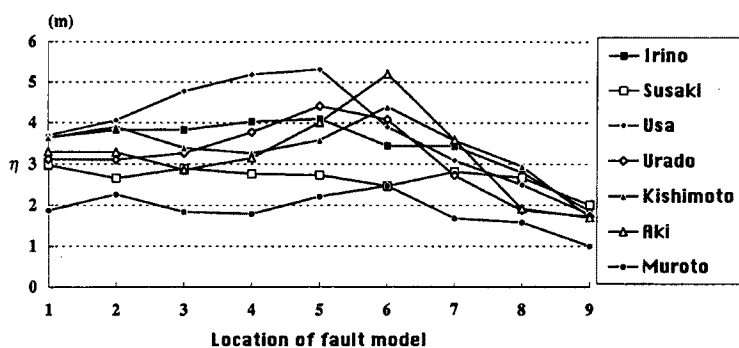
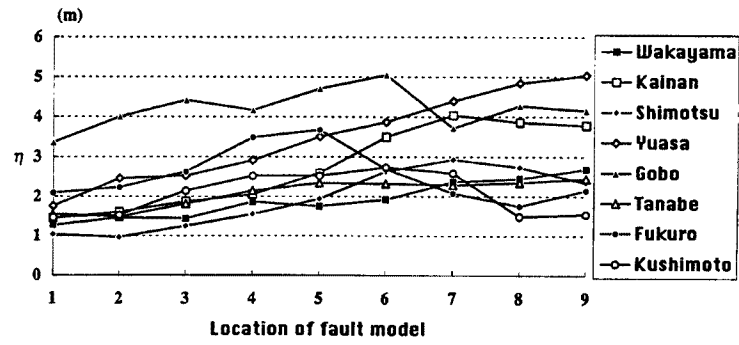
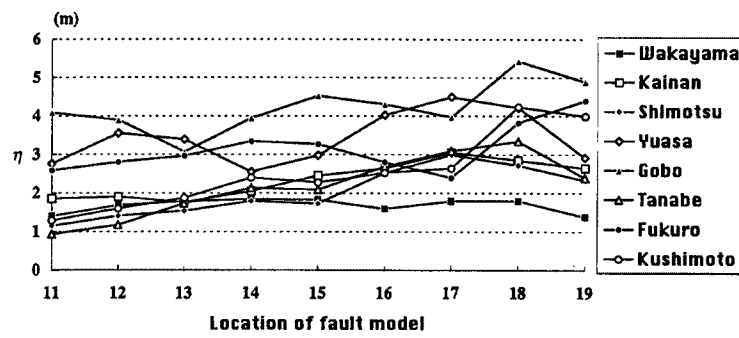


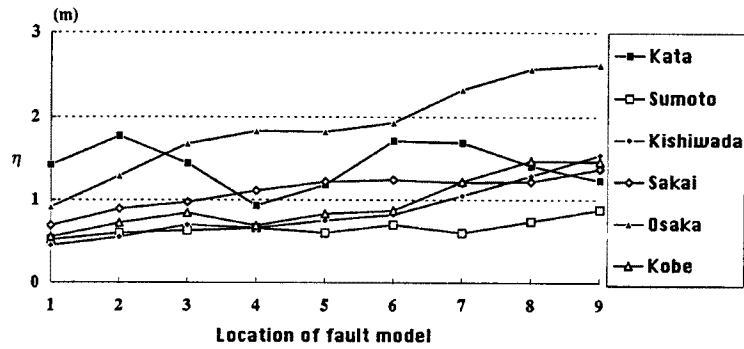
Fig. 19. Changes of the maximum water level with location of fault model.



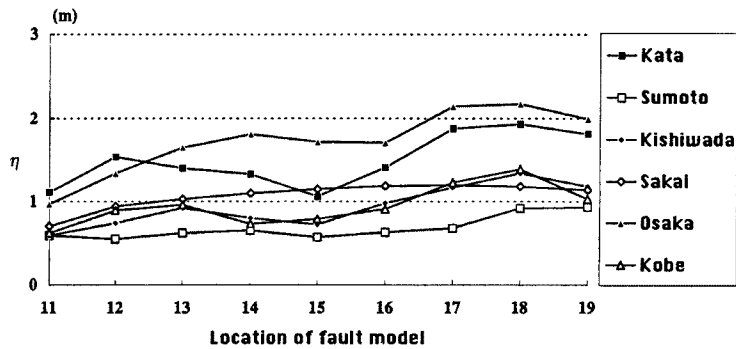
(e) Wakayama Prefecture



(f) Wakayama Prefecture



(g) Osaka and Hyogo Prefectures



(h) Osaka and Hyogo Prefectures

Fig. 19. (continued.)

Table 3. Wave number with the maximum water level after getting the tsunamis.

Location of fault model	Susaki	Asakawa	Tanabe
1	4	1	11
2	4	1	3
3	5	1	3
4	1	1	3
5	1	5	3
6	1	2	5
7	1	2	6
8	1	2	6
9	1	2	3
11	1	1	7
12	4	1	10
13	1	1	3
14	1	1	3
15	5	5	3
16	1	2	6
17	1	2	6
18	1	2	6
19	1	3	6

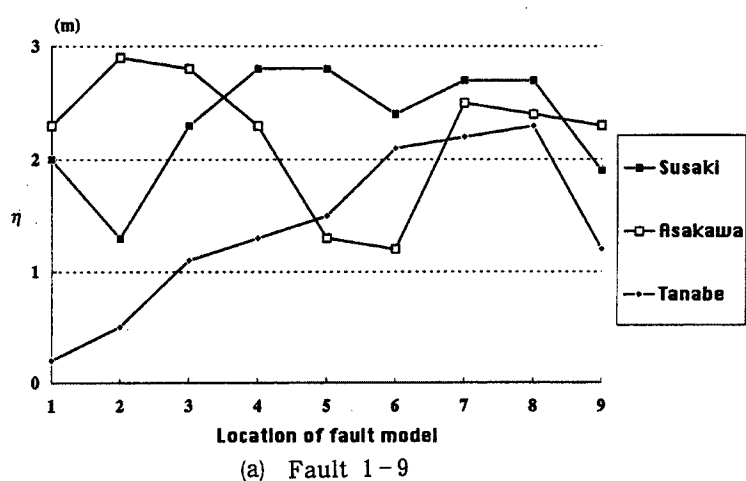


Fig. 20. Changes of water level of the first tsunami with the changes of location of fault model.

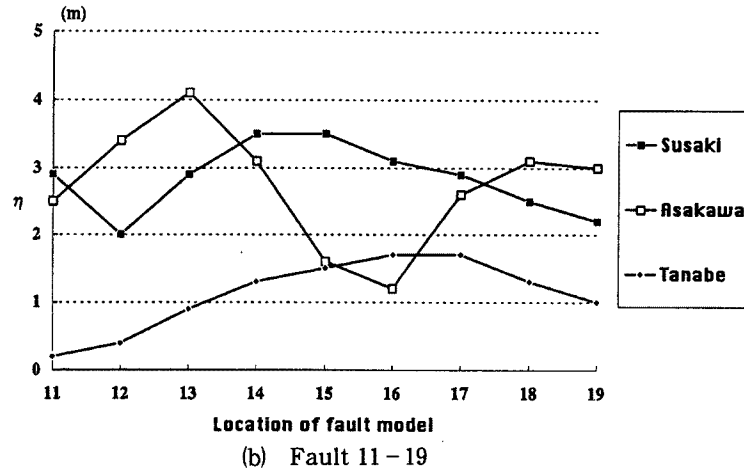


Fig. 20. (continued.)

8. 津波の危険度評価

津波災害は、津波常襲地帯と呼ばれるところでも、中規模程度のものが30～50年に1回の割合、大規模の津波になると80～100年に1回という頻度でしか起こらない自然災害である。つまり、その地域の住民が一生に1度遭遇するかもしれないという低頻度である。そのため、危険に対する備えという点からすると、時代と共に忘れ去られ、結果的に最も軽視されがちな危険となっている。このように発生頻度という観点から見ると、津波の危険度は小さいかもしれない。しかしながら、被害のインパクトという観点から見ると、わが国でも最悪の場合千人以上の死者が想定され、津波災害は極めて悲惨な部類に入る災害の1つである。1993年に発生した北海道南西沖地震による津波もそうであったし、また過去に発生したいわゆる歴史津波もその部類に入るといってよい。したがって、津波の危険度をどのように評価するかということは、非常に重要な問題である。

近年、津波の数値計算の精度の向上は、電子計算機の発達とあいまって目覚ましいものがある。その一方で、津波危険度をどのように評価するかという問題は、かなり立ち遅れている感がある。本研究では、この点を考慮して、まだ不十分なものではあるが、数値計算によって求めた津波の伝播特性に基づいて、津波の危険度の評価をいろいろな観点から行うことにした。

8.1 津波の外力の大きさによる評価

津波の外力の大きさによる評価に用いるパラメーターは、流速 u および水位 η である。その適用例として、田辺湾について数値計算を行った。田辺湾の数値計算を行うにあたっては、空間格子の寸法を100 mとし、また最小水深を5 mとした。さらに、差分計算を安定させるために、計算時間間隔を1 secにした。そして、第7章と同じように断層モデルを移動することにより、田辺湾における最大水位および最大流速を求めた。さらに、津波による被害は、水位 η の効果だけではなく、流速 u との相乗効果によるということ considering、パラメーターとして、 $u\eta$ という値を考える。最大水位 $\eta_{\max}$ 、最大流速 $u_{\max}$ および $u\eta$ の最大値 $(u\eta)_{\max}$ を田辺湾について求めた計算結果を、Fig. 21に表す。河田¹³⁾によると、木造家屋は $u\eta \geq 10$ で全壊することがわかっている。田辺湾において、 $(u\eta)_{\max} \geq 10$ となる地域をFig. 22に表した。

これより、外力の大きさ、すなわち $u\eta$ による津波の危険度評価を行うと、次のようになる。まず、Fig. 22において沿岸部の全メッシュ数を求めると、417となる。また、 $(u\eta)_{\max} \geq 10$ となる地域のメッシュ数

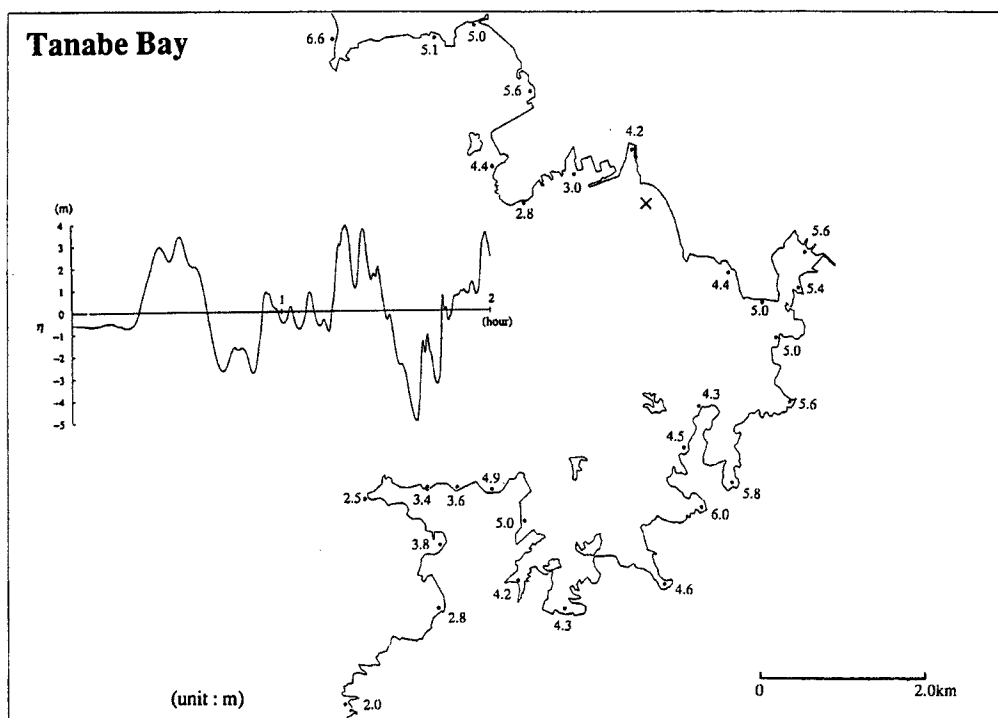


Fig. 21 (a). Spatial distribution of the maximum water level ($\eta_{\max}$) at Tanabe bay.

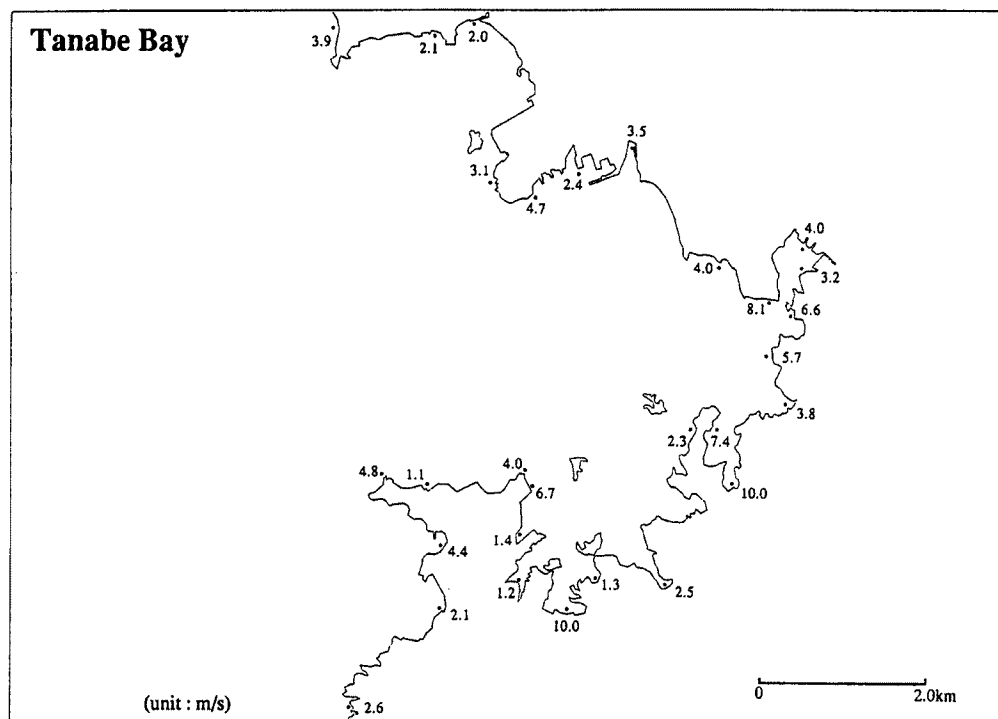
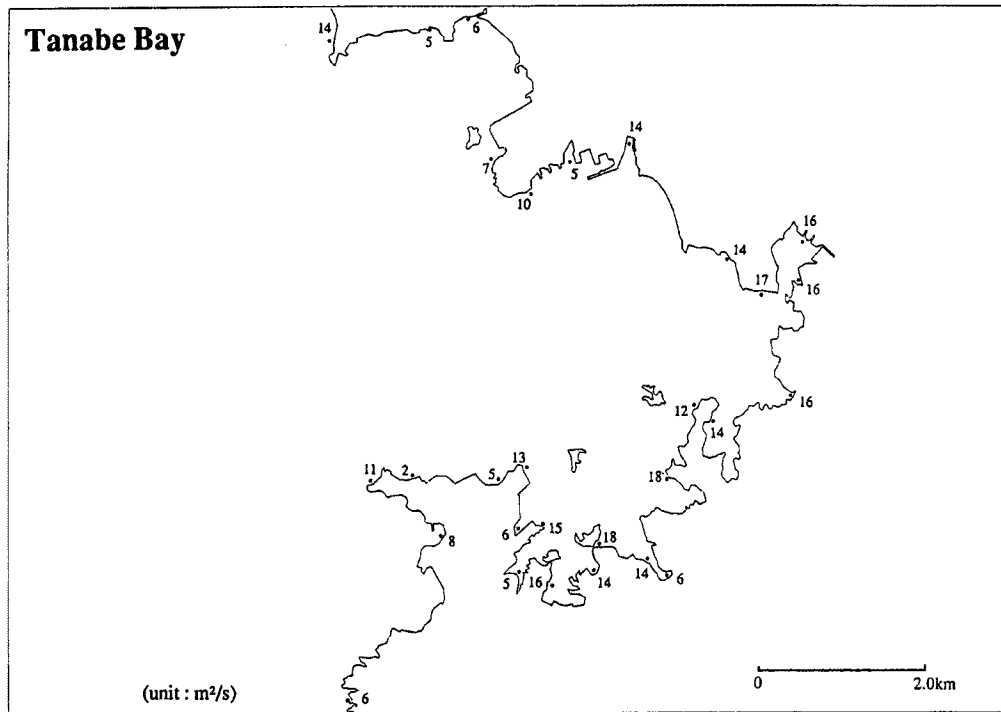
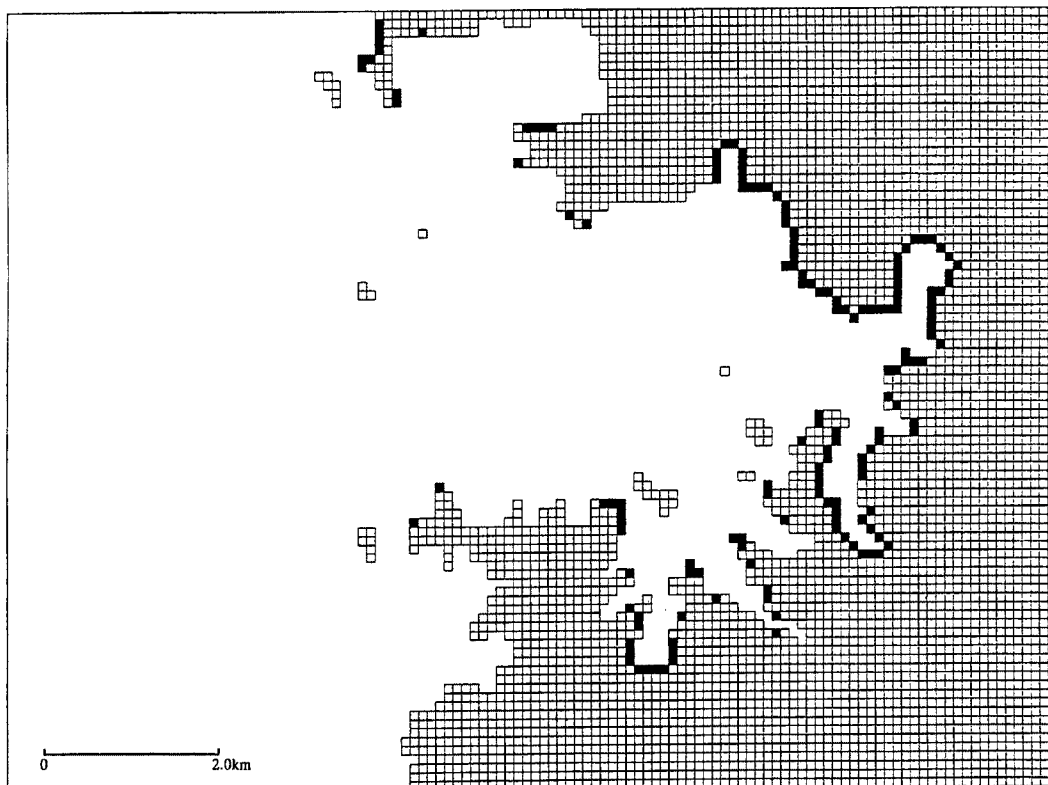


Fig. 21 (b). Spatial distribution of the maximum velocity ($u_{\max}$) at Tanabe bay.

Fig. 21 (c). Spatial distribution of $(u\eta)_{\max}$ at Tanabe bay.Fig. 22. Spatial distribution of dangerous area (dark zone) with $(u\eta)_{\max} \geq 10$.

は、158 である。したがって、沿岸部の家屋の全壊率は、 $158/417$ により 37.9% となる。つぎに、家屋が全壊した場合の死亡リスクは、南海津波（1946）の場合が 0.12、東南海津波（1944）の場合が 0.04、ということがわかっている¹⁴⁾。この違いは、南海地震（1946）が発生したのが午前 4 時過ぎであるのに対し、東南海地震（1944）は午後 1 時過ぎであったことにありと思われる。社会環境の変化によって、当然これらの数値も変化していようが、ここでは便宜的に、地震津波が夜間に発生した場合の家屋全壊による死亡リスクを 0.12、昼間に発生した場合は 0.04 とすることにする。結局、田辺湾沿岸部での死亡リスクは、津波が夜間に発生した場合は、

$$0.379 \times 0.12 = 0.046$$

となり、昼間に発生した場合は、

$$0.379 \times 0.04 = 0.015$$

となることがわかる。1993 年の北海道南西沖地震津波による奥尻島の死亡リスクが 0.043 であるから、津波が夜間に発生した場合の死亡リスク 0.046 はかなり大きな数字であると言える。田辺市の人口が 71713 人（1992 年 9 月 30 日現在）であるから、仮に田辺市の住民が沿岸に一様に分布しているとすると、津波が夜間に来襲した場合には、3263 人が死亡することになる。

8.2 津波の到達時間による評価

すでに、津波の最短到達時間の地域分布を Fig. 16 に表した。この図を利用して津波の到達時間による危険度評価を行う。河田¹⁵⁾によると、災害環境と疫病環境との間にはアナロジーが成り立つという。その類似性を示すと Table 4 のようになる。すると、次のように仮定することができる。すなわち、自然災害による被害の広がりや伝染病の罹病者の広がりとの間に、アナロジーが成立すると仮定する。具体的に説明すると、災害の被災者数の時間的変化の形が、インフルエンザの罹病者数の時間的変化¹⁶⁾の形と等しいとみなすのである。インフルエンザの罹病者数の時間的変化とのアナロジーによって推定した災害による死亡リスクの時間的変化を Fig. 23 に表す。

Fig. 16 と Fig. 23 とを組み合わせ、以下のように津波の到達時間による危険度評価を行う。例えば、

Table 4. Analogy of environment between natural disaster and infectious disease.

Environment of infectious disease
1) natural environment of climate, animal and plant 2) population and its distribution, social environment of population density and social activity 3) physiological environment of human body 4) economic condition of agricultural products and marketing system 5) political environment of war and revolution 6) cultural environment of symptomatic treatment, knowledge and experience
Environment of natural disaster
1) natural environment of external force, topography and geology 2) population and its distribution, social environment of population density and social capitals 3) socially pathological environment of human society 4) economic condition of wealth and information 5) political environment of war and revolution 6) cultural environment of knowledge, experience and wisdom for natural disaster

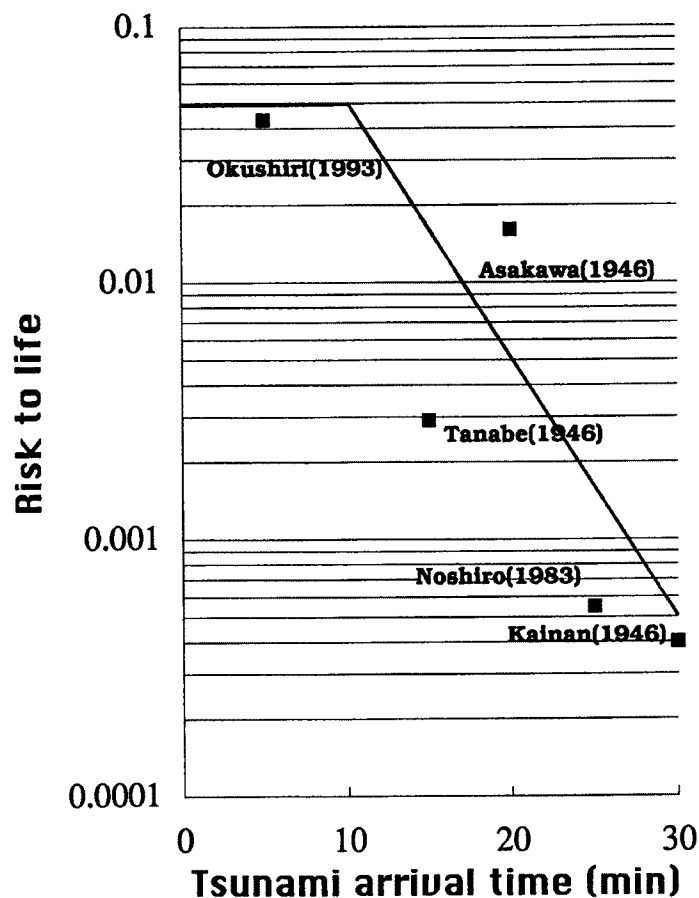


Fig. 23. Changes of risk to life with time.

Fig. 16 において室戸周辺の地域は、10 分以内で津波が到達する場合と、10～20 分で津波が到着する場合とがある。これを、Fig. 23 と組み合わせて評価するには、地震発生からの経過時間すなわち津波の到着時間の 0 分から 20 分までの死亡リスクの平均でもって、その地域の危険度とする。実際に平均をとってみると、室戸周辺地域の平均の死亡リスクは 0.038 となる。その他の地域についても同様にして津波の危険度を評価すると、Fig. 24 のようになる。

8.3 津波の発生確率による評価

津波の発生確率によって、津波の高さを推定したものに Kawata・Tsuchiya¹⁷⁾ がある。ここでは、それに示されている考え方に基づいて、津波の発生確率による評価を行う。

津波の発生原因となるマグニチュード 8 以上の海洋性巨大地震の発生確率は、南海トラフでは次のように与えられる。

$$F_T^*(t) = F_T(t)/F_T(t_u) : t \leq t_u \dots\dots\dots (15)$$

$$F_T(t) = \begin{cases} 1 - \exp(-\nu_0(t - t_0)) : t \leq t_0 \\ 0 : t \leq t_0 \end{cases}$$

ここに、 t_u および t_0 はそれぞれ地震の発生間隔の上限および下限、 ν_0 は平均発生率である。

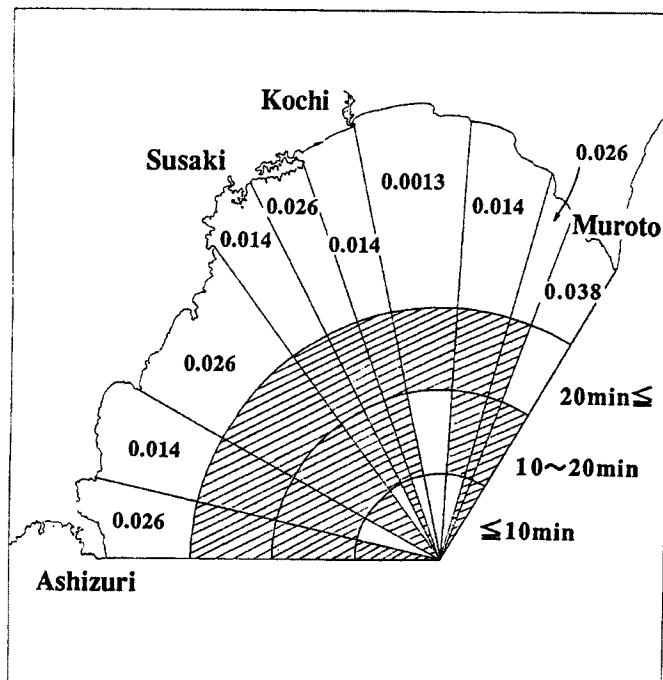


Fig. 24 (a). Changes of risk to life with arrival time of tsunami around Tosa bay.

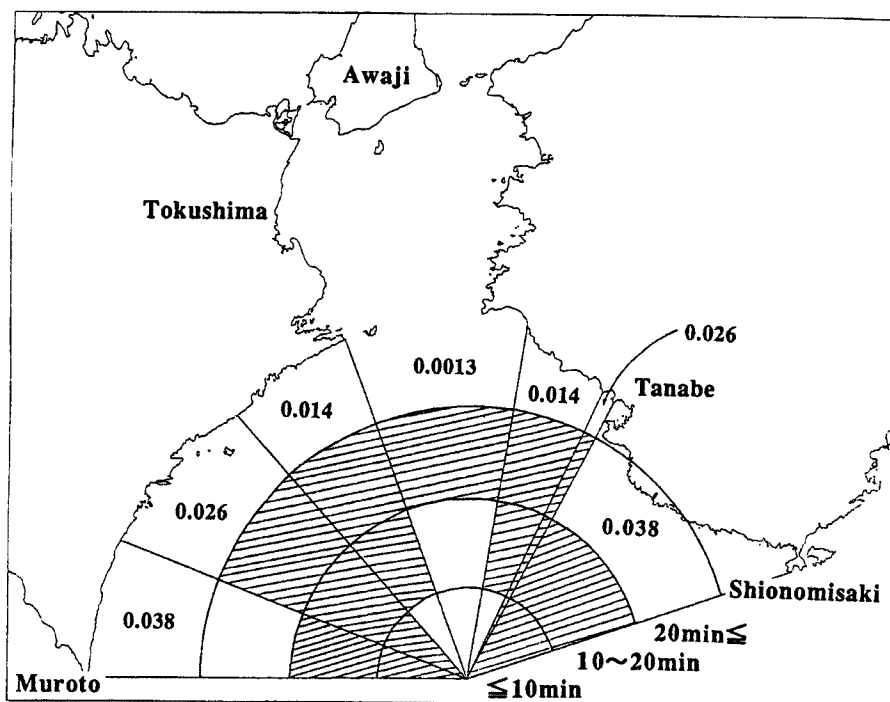


Fig. 24 (b). Changes of risk to life with arrival time of tsunami around the Kii strait.

これらのパラメーターは、すでに Kawata・Tsuchiya によって $t_0 = 71.8$ years, $t_u = 270$ years, $\nu_0 = 1.091 \times 10^{-2}/\text{year}$ のように推定されている。したがって、式(15)より累積確率関数は次のようになる。

$$F_T^*(t) = 1.130 \times \{1 - \exp(-0.0109 \times (t - 71.8))\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

これより、津波の平均発生率は 137.7 年となる。そして、マグニチュード 8 以上の大地震からの経過時間を t_s とすると、 t 年以内に津波が発生する確率は、次のように与えられる。

$$P(t) = \frac{F_T^*(t+t_s) - F_T^*(t_s)}{1 - F_T^*(t_s)} \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに、パラメーター t は、現在から将来地震が発生するまでの経過時間を表す。式(17)の計算結果を図示すると、Fig. 25 のようになる。

さらに、地震の震央位置の空間分布が、同じく Kawata・Tsuchiya によって正規分布として近似的に与えられている。その分布形を Fig. 26 に表す。正規分布の確率密度関数は次のように与えられる。

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 μ は平均値を、 σ は標準偏差を表す。平均値 μ は東経 135.82° 、また標準偏差 σ は 0.836 である。

これらの確率分布を用いると、津波の発生確率は次のように推定できる。式(16)より、 t 年以内にマグニチュード 8 以上の地震が発生する確率の確率密度関数は、

$$f_T^*(t) = \frac{dF_T^*(t)}{dt} = \nu_0 \exp(-\nu_0(t-t_0)) \quad \dots\dots\dots (19)$$

のように表せる。ただし、 $\nu_0 = 1.091 \times 10^{-2}$ 、 $t_0 = 71.8$ である。

式(18)の正規分布は、マグニチュード 6 以上の地震についての分布であるが、この分布がマグニチュード 8 以上の地震についても成り立つと仮定すると、 t 年以内にマグニチュード 8 以上の地震が発生したという条件の下での震央の空間分布の条件付密度関数は、

$$f_{X|T}(x|t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad \dots\dots\dots (20)$$

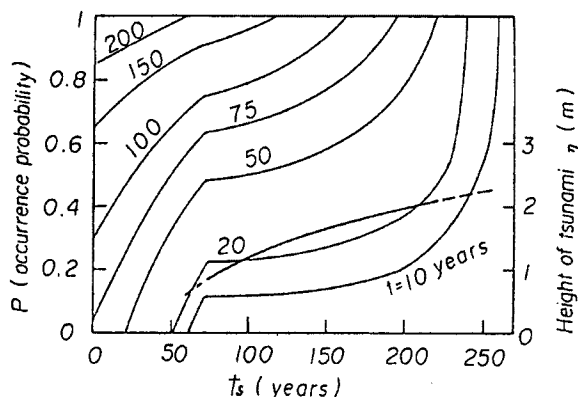


Fig. 25. Occurrence probability of earthquake with the magnitude of more than eight.

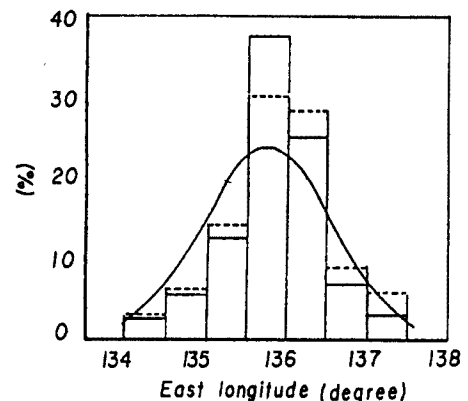


Fig. 26. Probabilistic density function of location of epicenter.

のようになる。ただし, $\mu = 135.82$, $\sigma = 0.836$ である。

したがって, 式(19) および式(20) より, 同時確率密度関数は,

$$\begin{aligned} f_{T,X}(t, x) &= f_{X|T}(x|t) \cdot f_T^*(t) \\ &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \times \nu_0 \exp(-\nu_0(t-t_0)) \\ &= \frac{\nu_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\nu_0(t-t_0) - \frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

となる。

例として, 田辺に水位 3 m 以上の津波が, 今後 30 年以内に来襲する確率を求めてみよう。まず, 南海トラフ沿いで一番最後に起こった大地震は, 1946 年の南海地震である。したがって, この地震からの経過年数 t_s は $t_s = 48$ years である。よって, 式(17) より, 今後 30 年以内に南海トラフ沿いでマグニチュード 8 以上の大地震により津波が発生する確率は,

$$P(t \leq 30 \text{ years}) = \frac{F_T^*(30+48) - F_T^*(48)}{1 - F_T^*(48)} = 30.6 (\%)$$

である。

次に, Fig. 27 より, 田辺に 3 m 以上の津波が来襲する震央の位置は, 135.375° から 135.875° である。したがって, 式(20) より, マグニチュード 8 以上の地震が発生したときに, 田辺に 3 m 以上の津波が来襲する確率は,

$$\begin{aligned} P(\eta \geq 3\text{m}) &= P(135.375 < X \leq 135.875) = \int_a^b f_X(x) dx = \int_a^b \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \\ &= \Phi\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{135.875-135.82}{0.836}\right) - \Phi\left(\frac{135.375-135.82}{0.836}\right) \\ &= 23.0 (\%) \end{aligned}$$

となる。

したがって, 田辺に水位 3 m 以上の津波が, 今後 30 年以内に来襲する確率は,

$$P(t \leq 30 \text{ years}, \eta \geq 3\text{m}) = 30.6\% \times 23.0\% = 7.04\%$$

となることがわかる。

いくつかの地域を選んで, 水位と経過年数をパラメーターとした津波来襲確率の一覧表を Table 5 に, それを図示したものを Fig. 28 に示した。

8.4 津波の危険度の総合的評価

8.1 および 8.2 では, それぞれ津波の外力の大きさ, 津波の到達時間をもとにして, 死亡リスクとしての津波の危険度が表された。一方 8.3 では, 津波の発生確率をもとにして, 確率としての津波の危険度が表された。つまり, ある水位を超過する津波が何年以内に発生する確率を求めたのであった。したがって, 津波の外力の大きさと発生確率とを結び付けた危険度評価とみなせる。

もともと死亡リスクも確率表現であり, それは津波の来襲を条件とした死亡確率である。したがって, これらの評価を結び付けるのは容易なことである。しかし, 津波の危険度をすべて確率でもって表現するのは, 問題があるように思われる。というのも, 人間の危険の感じ方がすべて確率的とは限らないからである。むしろ, 確率的に危険を感知することの方が少ないと言ってよい。それゆえ, 危険を確率で表現す

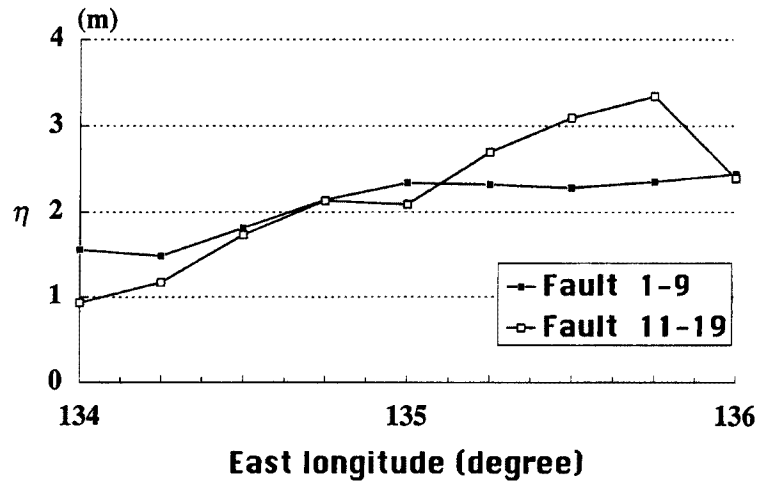


Fig. 27. Changes of the maximum water level with location of fault at Tanabe, Wakayama.

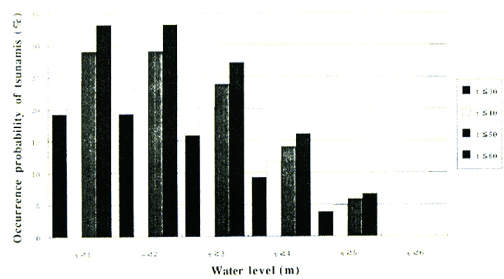
Table 5. Occurrence probability of tsunamis. (unit : %)

(a) Usa					(e) Yuasa				
	$t \leq 30$ years	$t \leq 40$ years	$t \leq 50$ years	$t \leq 60$ years		$t \leq 30$ years	$t \leq 40$ years	$t \leq 50$ years	$t \leq 60$ years
$\eta \geq 1$ m	19.3	24.5	29.1	33.3	$\eta \geq 1$ m	19.3	24.5	29.1	33.3
$\eta \geq 2$ m	19.3	24.5	29.1	33.3	$\eta \geq 2$ m	19.3	24.5	29.1	33.3
$\eta \geq 3$ m	15.9	20.1	23.9	27.3	$\eta \geq 3$ m	17.4	22.0	26.1	29.9
$\eta \geq 4$ m	9.3	11.8	14.1	16.1	$\eta \geq 4$ m	13.4	17.0	20.2	23.1
$\eta \geq 5$ m	3.9	4.9	5.9	6.7	$\eta \geq 5$ m	3.5	4.4	5.2	6.0
$\eta \geq 6$ m	0	0	0	0	$\eta \geq 6$ m	0	0	0	0

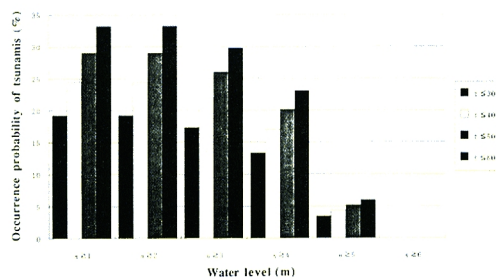
(b) Aki					(f) Tanabe				
	$t \leq 30$ years	$t \leq 40$ years	$t \leq 50$ years	$t \leq 60$ years		$t \leq 30$ years	$t \leq 40$ years	$t \leq 50$ years	$t \leq 60$ years
$\eta \geq 1$ m	19.3	24.5	29.1	33.3	$\eta \geq 1$ m	19.3	24.5	29.1	33.3
$\eta \geq 2$ m	19.3	24.5	29.1	33.3	$\eta \geq 2$ m	17.3	21.9	26.0	29.8
$\eta \geq 3$ m	15.9	20.1	23.9	27.3	$\eta \geq 3$ m	6.2	7.8	9.3	10.6
$\eta \geq 4$ m	8.6	10.9	12.9	14.8	$\eta \geq 4$ m	0	0	0	0
$\eta \geq 5$ m	6.3	8.0	9.5	10.9	$\eta \geq 5$ m	0	0	0	0
$\eta \geq 6$ m	0	0	0	0	$\eta \geq 6$ m	0	0	0	0

(c) Kannoura					(g) Osaka				
	$t \leq 30$ years	$t \leq 40$ years	$t \leq 50$ years	$t \leq 60$ years		$t \leq 30$ years	$t \leq 40$ years	$t \leq 50$ years	$t \leq 60$ years
$\eta \geq 1$ m	19.3	24.5	29.1	33.3	$\eta \geq 1$ m	19.0	24.1	28.6	32.7
$\eta \geq 2$ m	19.3	24.5	29.1	33.3	$\eta \geq 2$ m	9.6	12.2	14.5	16.6
$\eta \geq 3$ m	10.6	13.5	16.0	18.3	$\eta \geq 3$ m	0	0	0	0
$\eta \geq 4$ m	7.1	9.0	10.7	12.2	$\eta \geq 4$ m	0	0	0	0
$\eta \geq 5$ m	7.1	9.0	10.7	12.2	$\eta \geq 5$ m	0	0	0	0
$\eta \geq 6$ m	3.5	4.4	5.2	6.0	$\eta \geq 6$ m	0	0	0	0

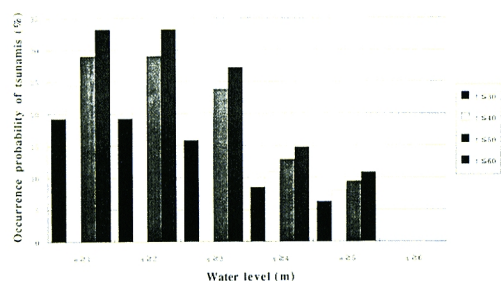
(d) Mugi					(h) Kobe				
	$t \leq 30$ years	$t \leq 40$ years	$t \leq 50$ years	$t \leq 60$ years		$t \leq 30$ years	$t \leq 40$ years	$t \leq 50$ years	$t \leq 60$ years
$\eta \geq 1$ m	19.3	24.5	29.1	33.3	$\eta \geq 1$ m	9.6	12.2	14.5	16.6
$\eta \geq 2$ m	19.3	24.5	29.1	33.3	$\eta \geq 2$ m	0	0	0	0
$\eta \geq 3$ m	15.4	19.6	23.2	26.6	$\eta \geq 3$ m	0	0	0	0
$\eta \geq 4$ m	13.4	17.0	20.2	23.1	$\eta \geq 4$ m	0	0	0	0
$\eta \geq 5$ m	9.6	12.2	14.5	16.6	$\eta \geq 5$ m	0	0	0	0
$\eta \geq 6$ m	6.2	7.8	9.3	10.6	$\eta \geq 6$ m	0	0	0	0



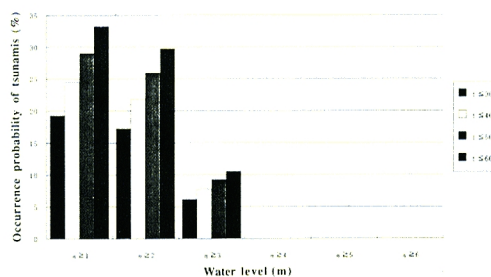
(a) Usa



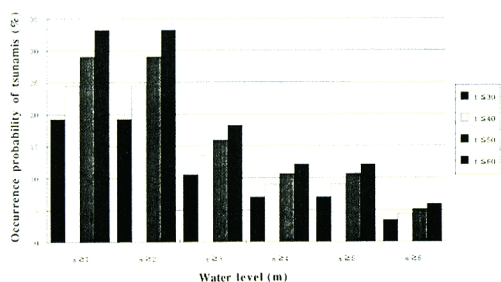
(e) Yuasa



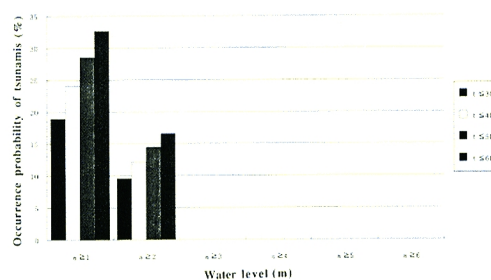
(b) Aki



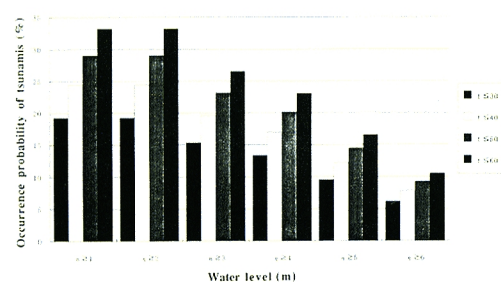
(f) Tanabe



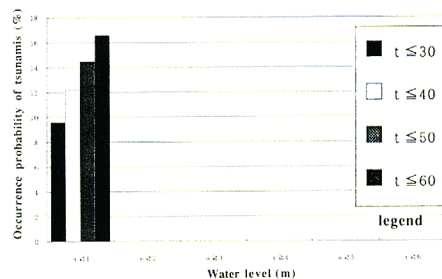
(c) Kannoura



(g) Osaka



(d) Mugi



(h) Kobe

Fig. 28. Occurrence probability of tsunamis.

ることは、危険ということの本質からすると間違っているのかもしれない。

しかし、人によって危険の感じ方はさまざまであるから、つまり危険の感じ方は主観的であるから、危険を客観的に評価するにはどうしても確率表現に頼らざるを得ないのが現状である。本研究でも、危険の本質から鑑みて、津波危険度を確率で評価することには問題があるとしながらも、とりあえず確率でもって、具体的には津波の死亡リスクをいろいろな危険の死亡リスクと比較することによって、津波危険度の総合的評価とすることにする。

8.1 では、外力の大きさとして $(u\eta)_{\max} \geq 10$ の場合の死亡リスクを求めたが、Fig. 27 より田辺の最高水位は 3.34 m であるから、 $\eta \geq 3$ m の場合の死亡リスクもそれに等しいと仮定すると、8.3 より、

$$P(t \leq 30 \text{ years}, u\eta \geq 10) = P(t \leq 30 \text{ years}, \eta \geq 3\text{m}) = 30.6\% \times 23.0\% = 7.04\%$$

となる。したがって、田辺における今後 30 年以内の津波来襲による死亡リスクは、津波が夜間に発生した場合に、

$$0.0704 \times 0.046 = 0.00324 = 3.24 \times 10^{-3}$$

となることがわかる。絶対数で言うと、田辺市の人口が 71,713 人であるから、232 人である。

一方、田辺市における交通事故による年間死者数は、8 人（1993 年度）であるから、交通事故による死亡リスクは、

$$\frac{8}{71713} = 0.000112 = 1.12 \times 10^{-4}$$

である。また病気による年間死者数は、545 人（1992 年度）であるから、病気による死亡リスクは、

$$\frac{545}{71713} = 0.00760 = 7.60 \times 10^{-3}$$

である。これらと比較すると、津波による死亡リスク 3.24×10^{-3} は、決して小さい数字とは言えないことがわかる。

8.5 津波の危険度評価のまとめ

これまでいろいろな方法で津波危険度の評価を行ってきたが、田辺について求められた危険度をまとめると、Table 6 のようになる。

最初の 2 つの死亡リスクは、津波が来襲したもとの死亡リスクであり、最後の外力と発生確率を結び付けた死亡リスクは確率を考慮してあるので、当然オーダーが異なる。前者 2 つの死亡リスクは、津波危険度の地域性を論じることはできるが、それを津波以外のリスクと比較することはできない。一方、後者の死亡リスクは、発生確率も考慮してあり、津波発生から人的被害発生を包括するものとして、ここでは一番信頼できると考えられ、その適用については、さらに今後検討を進める必要があろう。

Table 6. Comparison of the tsunami risk at Tanabe.

estimation factor	(a) external force	(b) arrival time	(c) occurrence probability	(a) and (c)
encounter probability	0.046 (risk to life)	0.038 (risk to life)	0.0704 (probability)	0.0032 (risk to life)

9. 結 語

津波防災について危機管理と津波避難マニュアルの作成という立場から考察した。得られた主な成果を

要約すると、つぎの通りである。

(1) 自然災害の危機管理(エマージェンシーマネジメント)は、災害前のリスクマネジメントと災害発生時及びその後のクライシスマネジメントに分けることができる。

(2) 危機管理の対象はハードウェア(防災構造物)、ソフトウェア(災害情報)、ヒューマンウェア(人間対応)及びコマンドウェア(管理系統)の4種類である。後二者は従来、ソフトウェアに含まれたものであるが、とくに巨大災害の場合には、内容的にこの4つに分けた方が適切である。

(3) 都道府県レベルでの緊急対応組織として、復興を目的とした広域災害対策本部と、復旧を目的とした災害対策センターの2つが必要である。後者では、マスコミ、社会基盤施設復旧情報センター、各地区災害対策本部、避難所、ボランティア、広域行政協力、救命・救援を担当する部局が必要であり、その調整をする必要がある。

(4) これからの緊急対応では、それぞれの対策本部とセンター間に防災地理情報システム(防災GIS)の構築が必須であって、これによって実時間の被害把握、復旧・復興が可能となると判断される。

(5) 過去の津波による外力の最大値が今後起こりうる外力の最大値とは限らず、地震断層運動の起こる位置によってはさらに大きな外力が発生する可能性がある。したがって、これまでの海岸構造物の設計基準や地域防災計画を見直す必要がある。

(6) 津波の最短到達時間についても、地震の発生位置によって大きな差が生じる。したがって、地域によっては、気象庁からの津波情報の伝達ルートの整備と地震直後に来襲する津波に対する住民避難マニュアルの準備が必要となる。

(7) 津波危険度の評価として、次のような4つの方法を提案した。すなわち、1) 津波の外力による評価、2) 津波の到達時間による評価、3) 津波の発生確率による評価、および4) 津波の危険度の総合的な評価である。そして、これらの方法の適用性について考察した結果、現状では、4)による方法がもっとも妥当であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 河田恵昭：地震直後の対応の遅れと危機管理，自然災害科学 阪神・淡路大震災緊急対応特集号，1995，pp. 5-15.
- 2) 土木学会 海岸工学委員会 研究現況レビュー小委員会：海岸波動一波・構造物・地盤の相互作用の解析法一，1994，pp. 242-243.
- 3) 島田富美男・森 泰広・酒井哲郎：臨海工業地帯沿岸での津波の挙動，第31回海岸工学講演会論文集，1983，pp. 228-232.
- 4) 土屋義人・河田恵昭・酒井哲郎・島田富美男：大阪における安政南海道津波の復元(2)，一津波の伝播・氾濫特性について一，京都大学防災研究所年報，第31号B-2，1988，pp. 723-751.
- 5) L. Mansinha and D. E. Smylie：The displacement fields of inclined faults, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5, 1971, pp. 1433-1440.
- 6) 相田 勇：南海道沖の津波の数値計算，東大地震研究所彙報，Vol. 56，1981，pp. 713-730.
- 7) Ando, M.：Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai Trough, Japan, Tectonophysics, 1975, pp. 119-140.
- 8) Ando, M.：A fault model of the 1946 Nankaido earthquake derived from tsunami data, Phys. Earth. Planet. Inter., 28, 1982, pp. 320-336.
- 9) Aida, I.：Numerical experiments for tsunamis caused by moving deformation of the sea bottom, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 47, pp. 849-862.
- 10) 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦：数値波動解析法による港内波高分布の計算，港湾技術研究所報

- 告, 第 14 卷, 第 3 号, 1975, pp. 35 - 58.
- 11) 昭和 21 年南海大地震報告, 津波篇, 水路要報増刊号, 第 201 号, 1948, pp. 1 - 39.
 - 12) 羽鳥徳太郎: 大阪府・和歌山県沿岸における宝永・安政南海道津波の調査, 東大地震研究所彙報, Vol. 55, 1980, pp. 505 - 535.
羽鳥徳太郎: 高知・徳島における慶長・宝永・安政南海道津波の記念碑, — 1946 年南海道津波の挙動との比較 —, 東大地震研究所彙報, Vol. 53, 1978, pp. 423 - 445.
羽鳥徳太郎: 高知県南西部の宝永・安政南海道津波の調査, 一久礼・入野・土佐清水の津波の高さ —, 東大地震研究所彙報, Vol. 56, 1981, pp. 547 - 570.
 - 13) 河田恵昭: 高潮及び洪水の氾濫による都市水害とその予測に関する研究 (岩佐義朗編), 第 24 回自然災害科学総合シンポジウム要旨集, 1987, pp. 11 - 22.
 - 14) 和達清夫編: 津波・高潮・海洋災害, 共立出版, 1970, p. 164.
 - 15) 河田恵昭: 比較自然災害論序説—天変地異とベスト—, 京都大学防災研究所年報, 第 34 号 B-2, 1991, p. 518.
 - 16) 園口忠男: インフルエンザ, 金原出版, 1980.
 - 17) Y. Kawata and Y. Tsuchiya: Extremal Statistics of Tsunamis in Osaka, Proc. of the 6th Congress of APD-IAHR, 1988, pp. 241 - 247.