

# 津波の伝播特性に基づく危険度評価について

河田 恵昭\*・小池 信昭\*\*・島田富美男\*\*\*

## 1. 緒 言

1993年7月12日に発生した北海道南西沖地震津波によって、奥尻島は壊滅的な打撃を受け、また北海道の南西部の町村も特定の地域でかなりの被害を被った。地震発生から津波の第1波の到着まで5分とかからなかった地域もあり、現存するような警報伝達・避難体制ではこのような津波に対しては多くの問題があり、とくに人的被害の軽減の観点から不十分であることが明らかとなった。そのため、これまでの地域防災計画に基づく避難マニュアルに加えて、このような地震直後に来襲する津波に対する避難マニュアルの必要性がとくに強調されるようになってきた。そこでは、とくにいつ地震が発生するかという点が重要であって、単に起こることを想定した過去の地震津波データの解析だけでは、十分とはいえない。

そこで本研究では、まず、過去の地震発生の経緯を踏まえて地震断層モデルを人為的に移動させ、南海道沖で発生する地震津波の数値計算を行う。それによって、紀伊水道および土佐湾沿岸域での津波の水位および到達時間などの伝播特性の地域分布を明らかにする。さらに、その結果を用いて、人的被害を予測するために、災害危険度を定量的に評価することを試みる。

## 2. 津波伝播の数値計算

津波伝播の基礎方程式として、連続式と Navier-Stokes の方程式を水深方向に積分した以下のような浅水方程式を用いた。

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

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

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{M}{D} \cdot \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{N}{D} \cdot \frac{\partial N}{\partial y} + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{f}{D^2} NQ = 0 \dots\dots\dots (3)$$

\* 正 会 員 工 博 京都大学教授 防災研究所 地域防災システム研究センター

\*\* 学生会員 京都大学大学院工学研究科

\*\*\* 正 会 員 工 修 阿南工業高等専門学校助教授 土木工学科

ここに、 $(x, y)$ ：水平の直交する2方向の座標、 $t$ ：時間、 $\eta$ ：水位変動、 $h$ ：静水深、 $\xi$ ：海底変動量、 $D$ ： $D = h + \eta - \xi$ で表される全水深、 $g$ ：重力加速度、 $f$ ：海底摩擦係数、 $(M, N)$ ： $(x, y)$ 方向の線流量、 $Q$ ： $Q = \sqrt{M^2 + N^2}$ である。

そして、従来の研究成果(島田ら, 1983; 土屋ら, 1988)を参照して、図-1に示すような計算領域に対して、上式を差分化して数値計算を行った。ここで、空間格子の寸法を領域1では5 km、領域2で2.5 km、領域3で1.25 kmとして、領域1では移流項と摩擦項を無視した。また、すべての領域で最小水深を5 mとし、差分の安定性を考慮して計算時間間隔を10秒として、計算を4時間まで行うことにした。さらに、海底摩擦係数を $f = 0.0025$ とした。

初期条件としては、地震断層モデルから Mansinha・Smylie (1971) の方法を用いて計算した海底地盤変動量の鉛直成分を、海面上の水位変動として与えた。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。境界条件は、陸地と海の境界では津波は完全反射すると仮定し、外海との境界では $M^2 + N^2 = gD\eta^2$  の関係を用いて線流量を決定した。また、2領域間の接続は、線形補間によって線流量および水位を与えた。

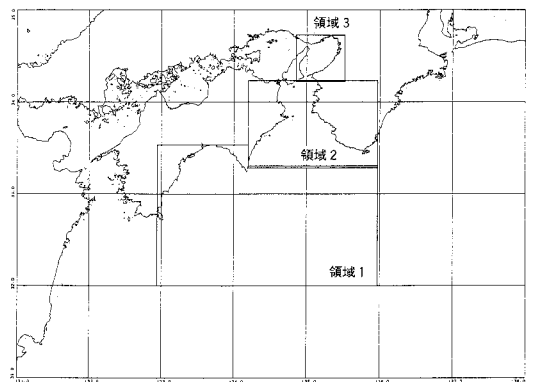


図-1 計算領域

### 3. 断層モデルの移動による津波の伝播特性

#### (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、歴史津波による既往外力の最大値が、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とも言える。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 (1981) の Model 20' の断層パラメーターを用いた。これは、2010 年ごろに、地震マグニチュードが 8.4 クラスの地震の再来が想定されるからである。そして、この断層を安政南海道地震の震央位置を中心として、図-2 のように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た。この図にあるように、地震の震央を 1~9 に沿う線と 11~19 に沿う線の 2つの線を動かした理由は、過去の南海トラフ沿いの地震震央分布 (Kawata・Tsuchiya, 1988) を調べると、これらの2つの線で挟まれるプレートの潜り込みの帯状部分に震央が集中しているの、陸地にもっとも近い場合と陸地からもっとも離れている場合とを考慮したためである。そして、18 ケースの断層モデルに対してそれぞれ数値計算を行って、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。

#### (2) 最短到達時間の地域分布

まず、18 ケースの各断層モデルに対して、最短到達時間の等時曲線を求めた。その 1 例を図-3 に表す。しか

し、これだけでは特定の断層モデルの津波特性しかわからない。そこで、これらの等時曲線を各断層モデルに対して求め、すべてを重ね合わせて津波の最短到達時間の地域分布を明らかにした。1 例として紀伊水道沿岸域における最短到達時間分布を図-4 に表す。この図で、たとえば潮岬から田辺までの地域は 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、最短到達時間の等時曲線が 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。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。図-4 から、ある対象地域に複数の時間帯で津波が到着しており、津波の被災経験に基づく到着時間の先入観に従って避難行動を取る

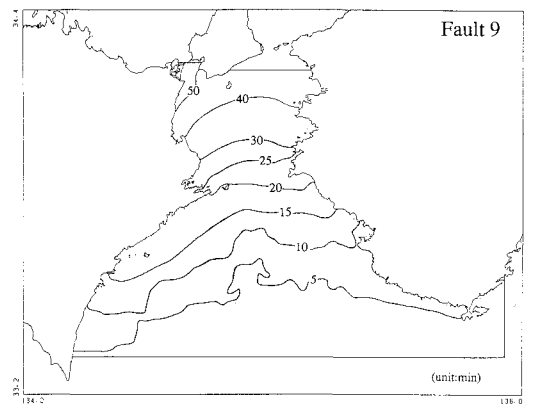


図-3 最短到達時間の等時曲線

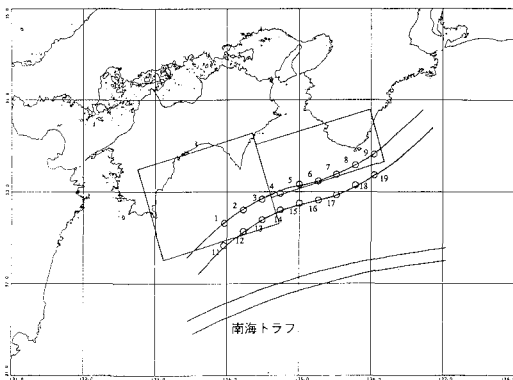


図-2 断層モデルの移動

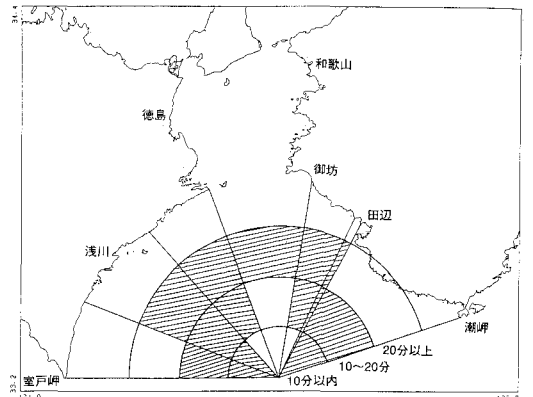


図-4 最短到達時間の地域分布

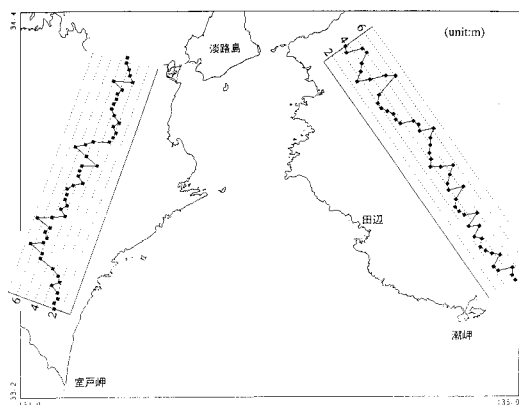


図-5 最大水位の地域分布

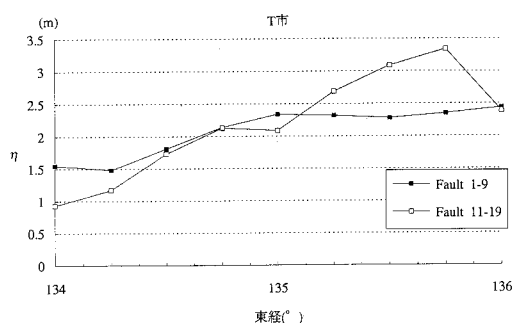


図-6 断層モデルの位置による最大水位の変化

ことは、極めて危険な場合が起こりうる事がわかる。また、地域にわたって津波の到着時間にかなりばらつきがあることもわかる。したがって、同一県内で同じような警報伝達・避難体制を取ることは不合理であり、各地域で独自の避難体制を考える必要があると言える。

### (3) 最大水位の地域分布

最短到達時間の場合と同様に、まず、18ケースの各断層モデルに対して最大水位の地域分布を求めた。そして、(2)と同様にそれらをすべて重ね合わせて、対象地域に起こりうる最大水位の地域分布を明らかにした。1例として紀伊水道沿岸域について、それを求めたものを図-5に表す。この図によって、対象地域がどのくらいの高さの津波に襲われる可能性があるのか、容易にわかる。したがって、この図は防災計画を立てるときに、想定津波高さを決定するのに非常に役立つと思われる。

一方、図-6は、断層モデルの位置によって対象地域の最大水位がどのように変化するかを調べるために、例として紀伊水道沿岸のT市について求めたものである。この図から、断層モデルの位置によって沿岸域を襲う津波の水位は2倍以上も差があり、最悪の場合には、過去に記録した最高水位をはるかに超える津波に襲われる可能

性があると言える。このことから、現在のわが国の地震予知では、とくに地震がいつ発生するかに力点がおかれているが、被害の評価では震源の位置も極めて重要であると指摘できる。

## 4. 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地域性があり、三陸沖で50~60年、南海トラフで100~150年に1回という低頻度である。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程度である。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、結果的に最も無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が、被害のインパクトという観点から見ると、現在の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。その意味では、航空機事故とよく似ている。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。本研究では、この点を考慮して、数値計算による津波の伝播特性に基づいて、津波危険度の評価を行うことにした。

### (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、流速および水位である。その適用例として、T湾沿岸について数値計算を行った。数値計算を行うにあたっては、空間格子の間隔を100mとし、また最小水深を5m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秒にした。そして、第3章と同じように断層モデルを移動することにより、T湾沿岸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、水位の効果だけではなく、流速との相乗効果によるということを考慮して、パラメーターとして、 $u\eta$ という値を考える。河田(1987)によると、木造家屋は $u\eta \geq 10$  ( $m^2/s$ ) ( $u$ : 氾濫流速,  $h$ : 浸水深)で全壊することがわかっている。そこで、沿岸部の流速が氾濫流速に、また沿岸部の水位が浸水深に等しいとし、 $u\eta \geq 10$ で同等の被害が出ると仮定して、T湾沿岸において $u\eta \geq 10$ となる地域を図-7に表した。

これより外力の大きさによる津波の危険度評価を行うと、次のようになる。まず、図-7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、 $u\eta \geq 10$ となる地域のメッシュ数は、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(和達, 1970)。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

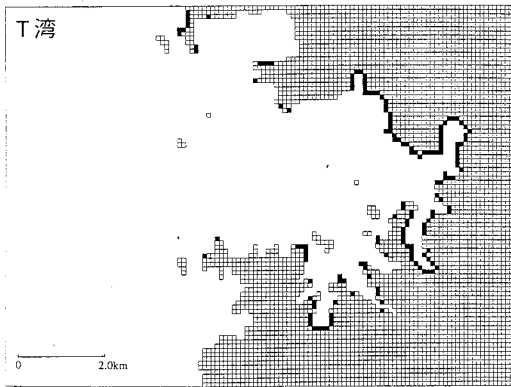


図-7 T湾沿岸で  $\eta \geq 10$  となる地域 (黒塗りの部分)

し、東南海地震 (1944) は午後1時過ぎであったことにあると思われる。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るようが、地震後10分以内に不意打ちにやってくる津波で、かつ避難方法等についても情報が事前にはない最悪の場合を想定する。この場合、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としても、それほどの間違ひではないと考えられる。結局、T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、

$$0.379 \times 0.04 = 0.015$$

となるのがわかる。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T湾沿岸の死亡リスク0.046はかなり大きな数字であると言える。T市の人口が71713人 (1992年9月30日現在) であるから、津波が夜間に来襲した場合には、最悪の場合、単純計算して3000人強が死亡することになる。

(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図-4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。過去のわが国の津波災害における津波到達時間と死亡リスクとの関係から、津波の死亡リスクの時間的変化を、図-8のように推定した。

図-4と図-8とを組み合わせて、以下のように津波の到達時間による危険度評価を行う。図-4において、ある地域では、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、図-8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をもって、その地域の危険度とする。実際に平均をとってみると、T湾沿岸での平均死亡リスクは0.038とな

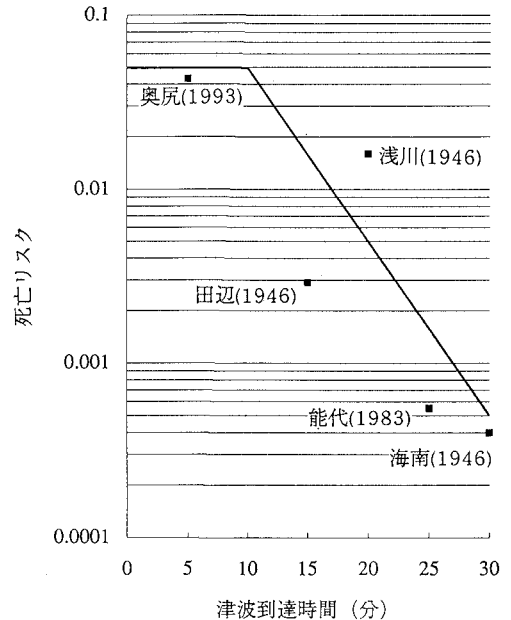


図-8 死亡リスクの時間的変化

る。

(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・Tsuchiya (1988) がある。ここでは、そこで示された考え方に基づいて、津波の発生確率による評価を行うことにする。

マグニチュード8以上の海洋性大地震からの経過時間を  $t_s$  とすると、今後  $t$  年以内に津波が発生する確率  $P(t)$  は、つぎのように与えられる。

$$P(t) = \frac{F_T^*(t+t_s) - F_T^*(t_s)}{1 - F_T^*(t_s)} \dots\dots\dots (4)$$

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

一方、地震の震央位置の空間分布が、近似的に正規分布として与えられ、 $t$  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地震震央の空間分布の条件付密度関数は、以下のように与えられる。

$$f_{X|T}(x|t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \dots\dots (5)$$

ただし、 $\mu = 135.82$ 、 $\sigma = 0.836$  である。

これらに基づいて、例として、T市に水位3m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近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1994年現在、 $t_s = 48$ 年である。よって、式(4)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、

$$P(t \leq 30 \text{年}) = 0.306$$

である。

つぎに、図-6より、T市に3m以上の津波が来襲する震央の位置は、 $135.375^\circ$ から $135.875^\circ$ である。したがって、式(5)より、マグニチュード8以上の地震が発生したときに、T市に3m以上の津波が来襲する確率は、

$$P(\eta \geq 3\text{m}) = P(135.375 < X \leq 135.875) \\ = 0.230$$

となる。

したがって、T市に水位3m以上の津波が、今後30年以内に来襲する確率は、

$$P(t \leq 30\text{年}, \eta \geq 3\text{m}) = 0.306 \times 0.230 \\ = 0.0704$$

となることがわかる。

#### (4) 外力と発生確率との組み合わせによる評価

(1)では、外力の大きさとして $u\eta \geq 10$ の場合の死亡リスクを求めたが、図-6よりT市の最高水位は3.34mであるから、 $\eta \geq 3\text{m}$ の場合の死亡リスクも(1)の場合に等しいと仮定する。これに、(3)で求めた発生確率を組み合わせれば、T市における今後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、

$$0.0704 \times 0.046 = 3.2 \times 10^{-3}$$

となることがわかる。絶対数で言うと、T市では、232人程度が死亡すると見込まれる。

#### (5) 津波の危険度評価のまとめ

T市について求められた危険度をまとめると、表-1のようになる。外力および到達時間による評価は、津波来襲を前提にした危険度である。したがって、地域ごとの危険度の相対的な比較をすることはできるが、津波がいつ来るか、すなわち海洋性地震の発生の履歴特性を考慮していないため、危険度としては適切な評価ではないと言える。一方、発生確率のみによる評価法は逆に、津波が発生した後どのような被害になるかについて明らかにすることはできないという問題がある。そこで、外力と発生確率の両者を考慮して、すなわち津波来襲確率という時間的評価と津波来襲後の被害評価の両面から評価を行えば、現実的な津波危険度としてもっとも理解しやすく、また妥当であると考えられる。実際、この方法で得られたT市の津波による死亡リスクは現時点で $3.2 \times 10^{-3}$ となり、毎年少しずつ大きくなることがわかった。この値は、同市の交通事故による死亡リスク $1.1 \times 10^{-4}$ および病気による死亡リスク $7.6 \times 10^{-3}$ などくらべ

表-1 T市における津波危険度(4つの評価法の比較)

評価方法	外力	到達時間	発生確率	外力と発生確率
津波危険度	0.046 (死亡リスク)	0.038 (死亡リスク)	0.0704 (確率)	0.0032 (死亡リスク)

て、決して無視できる数字ではないと言える。

## 5. 結 語

ここでは、安政南海道地震津波を想定し、断層モデルを南海トラフ沿いに移動して数値計算を行うことによって、過去の津波データの解析だけではわからない津波の伝播特性を明らかにした。すなわち、津波の最短到達時間は地域によってばらつきがあり、また同一地域でも断層の位置によって到達時間にかなり幅があることがわかった。同じことが、最大水位についても言え、最悪の場合には既往最高水位の2倍以上の高さの津波に襲われる可能性がある。そして、津波災害における人的被害を軽減するためには、あらかじめ対象地域の津波危険度を知っておく必要があるとの観点から、数値計算で求めた伝播特性に基づいて、とくに人的被害の津波危険度を評価した。その結果、外力と発生確率を組み合わせた評価が現時点ではもっとも妥当なものと考えられ、津波以外のリスクと比較しても決して小さな数字とは言えず、津波防災の日常的な重要性があらためて認識されたと言える。

## 参 考 文 献

- 相田 勇 (1981): 南海道沖の津波の数値計算, 東大地震研究所彙報, Vol. 56, pp. 713-730.
- 河田恵昭 (1987): 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, pp. 11-22.
- 島田富美男・森 泰広・酒井哲郎 (1983): 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, pp. 228-232.
- 土屋義人・河田恵昭・酒井哲郎・島田富美男 (1988): 大阪における安政南海道津波の復元(2), -津波の伝播・氾濫特性について-, 京都大学防災研究所年報, 第31号B-2, pp. 723-751.
- 和達清夫編 (1970): 津波・高潮・海洋災害, 共立出版, p. 164.
- Kawata, Y. and Y. Tsuchiya (1988): Extremal statistics of tsunamis in Osaka, Proc. of the 6th Congress of APD-IAHR, pp. 241-247.
- 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.