

研究展望

津波と防災

TSUNAMIS AND COUNTERMEASURES

首藤 伸夫*

By Nobuo SHUTO

1. はじめに

昭和 35 年来、わが国の津波対策事業は急速に進行し、チリ津波に被災した諸地域には中規模津波に対する防災施設が完成した。津波常襲地帯では大規模津波対策が検討されており、一部ではすでに実施されている。

これと並行して、沿岸地域利用形態や利用度にも、ここ 30 年間に大きな変化がみられた。その結果、過去の津波時には経験されなかった新しい形の大被害が発生し得る要因も増加している。

発生頻度の小さい大規模津波への対策を日常生活と調和する形で実施し、しかも新しい形の災害を予測して対処するためには、津波痕跡に対応する防災施設の建設という手法のみでは不十分と考えられる段階に至っている。

津波研究の分野での、ここ 10 数年の進歩は目覚ましいものであった。その背景には、プレートテクトニクスに基づいた地震発生機構の説明とその応用としての津波発生論、大容量高速計算機を駆使した数値シミュレーションとが挙げられる。

しかしながら、津波研究が偏った形でなされてきたことを認めないわけにはいかない。津波実態の把握は単に打上げ高を通じてのみなされたといっても過言ではない。津波の現地観測体制はきわめて貧弱で、津波専用観測機器は、建設中のものを含めてわずかに 4 台のみであって、予警報用としても津波実態把握用としても、ないに等しい。検潮儀や波高計は、水理特性や作動時間の関係から、特に波源に近い所では信頼に足る定量的な資

料を与えてはくれない。

昭和 58 年 5 月の日本海中部地震津波は、平滑な海岸線が 55 km も続く砂浜海岸で 15 m という打上げ高を生じ、リアス式海岸の湾奥で津波が大きくなるという従来の常識を覆し、新たな問題をなげかけた。

本論文では、津波研究の現状や津波対策の経緯とをまず概説し、ついでそれらの問題点や近い将来の研究と対策の方向について述べることにする。

2. 津波来襲の頻度

津波はひとたび発生すると大災害を起こしかねないが、発生時間間隔が大きいため、ともすれば忘れられてしまう。昭和 58 年の日本海中部地震津波はその好例であった。図-1 は羽鳥¹⁾がとりまとめた昭和 56 年までの過去 380 年の津波来襲エネルギーの分布であり、日本海

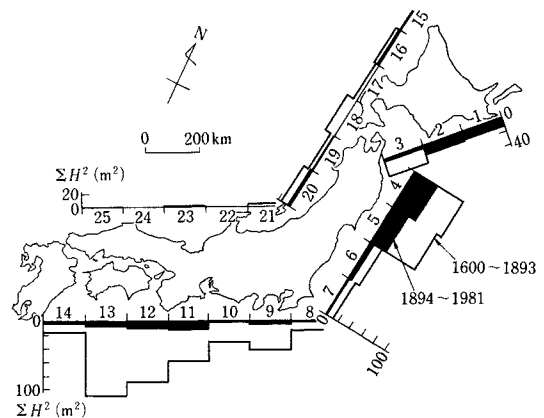
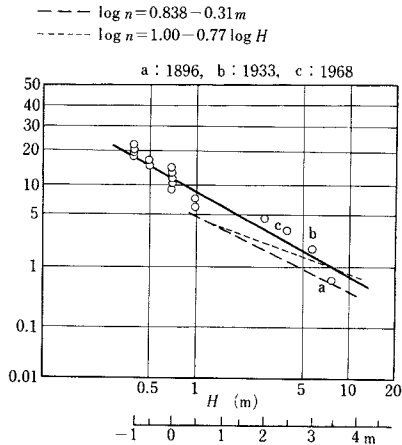


図-1 歴史津波と最近 88 年間に日本沿岸で受けた津波エネルギーの分布 (羽鳥による)

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市荒巻字青葉)



図一 津波の生起確率（1896年～1971年の三陸沿岸を対象としたもの）

といえども津波と無縁でないことを示しているものであった。わずかに島根県沿岸が被災しない場所と見受けられるが、隠岐島中村では津波で船舶が衝突し、落橋事故が昭和58年に発生している。

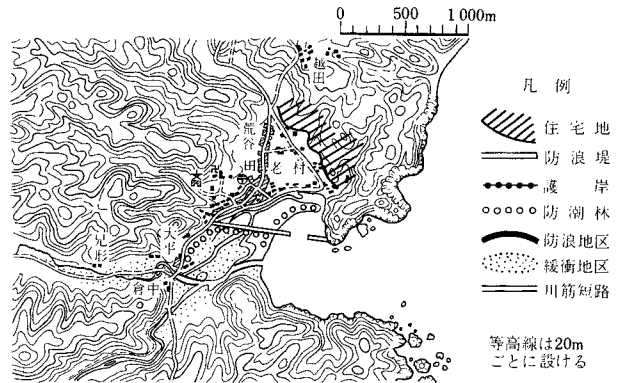
この図でみると、四国から紀伊半島にかけての地域が最も累積エネルギーが大きい。明治29年に2万数千人、昭和8年に3千人弱の死者を出した三陸地方よりも紀伊半島周辺の方が津波が頻りに来襲するのである。さらに、日本での津波打上げ高の最高記録は石垣島にあり、85mに達しているといわれる²⁾。

津波の生起確率を求めようとした試みの一例を図一2に示す³⁾。対象は三陸地方であり、平均の津波高 H に関して対数正規分布をするものと仮定している。点線は飯田が日本全沿岸について求めた関係⁴⁾、破線はSolovievが日本東海岸について得たもの⁵⁾である。

こうした取扱いにより、ある広がりをもった沿岸域全体における特定津波の重要度を表わすことはできるけれども、各地点での津波高の生起確率と直接関係があるわけではない。防災対策の対象となる各地点での津波高は、津波と沿岸地形の干渉の結果生じたものであるからである。同一湾内においてすら、小さな岬ひとつをへだてた隣接集落で、最大打上げ高を生ぜしめた津波が異なる例はいくつも存在する。

3. 津波防災対策の経緯

古い過去における津波対策の主流は高地移転であった。所により防潮堤の建設もみられたが、その高さ、強度は十分なものとはいえない。異例なものとしては、近くに避難適地がないため、海岸に高台を築いた事例が報告されている¹⁾。また、津波避難の言い伝えが残されていることもあった¹⁾。



図一 昭和10年当時の田老での防災対策案

津波対策に各種の手法があることをまとめて示したのは、昭和8年三陸大津波後の震災予防評議会である⁶⁾。防浪堤（現在の防潮堤、防波堤を含む）、防潮林、護岸、防浪地区、緩衝地区、避難道路、津波警戒、津波避難、記念事業が挙げられている。

図一3は岩手県田老（口絵写真参照）について提案されたものである。提案された諸手法は現在でももちろん通用するもので、基本的な手法はすべて挙げられている。しかし、防浪堤建設は費用の点から、防浪地区はその効果の定量的な判定と費用の点から問題があり、ほとんど実現しなかった。三陸地方の防潮林はこのとき造成されたものが多い。

高地移転は平常時には実施しにくい手法である。明治、昭和と40年間に2度の津波を受けた三陸地方では比較的多くの場所で高地移転がなされたものの、間もなく原地へ復帰してしまっただけの所もある。山口⁷⁾はこの間の事情を詳しく踏査し、日常生活の場である海岸からの距離と高度、移転先での飲料水の量と質、津波記憶の強弱、などが移転の成否を分ける要素であると指摘した。

記念事業として定着したものは記念碑と避難訓練である。「地震があったら津波が来る」と刻まれた石碑が義援金を使って各地に建てられ、昭和33年三陸大津波の来襲した3月3日に避難訓練・防災訓練が実施されてきた。

昭和35年チリ津波は地震の前触れなしに来襲し、新しい教訓を与えた。岩手県宮古市の観光地浄土ヶ浜には、大地震のあとには津波がくる、地震がなくとも津波がくる、という一見相矛盾する2つの碑が並んで立っている。

昭和34年9月の5千人の死者をだした伊勢湾台風にひきつづく沿岸災害であったことから、海岸保全事業が急速に進められた。チリ津波痕跡を対象とする防災施設の建造が主な対策であった。高さ5～6mの防潮堤、河川堤防を嵩上げる代わりに河口部津波水門、そして大船渡湾での津波防波堤の建設が実施された。このとき、北海道浜中町で津波危険区域の指定、その区域内での建

築物制限が町条例として施行されたことは特記しておいてよい⁸⁾。

チリ津波対策事業は昭和41年3月に完成をみたが、その直後の昭和43年6月、十勝沖地震津波が発生した。幸いにしてチリ津波と同規模であったため、防災施設が効力を発揮し浸水被害はほとんどなかった。ただし、これを契機として、大規模津波を経験していない年令層に、津波は恐るべき自然力ではないとの考えが広まり始めた。防潮堤前面の埋立地に居住の場を求めた人すらある。

チリ津波事業より約15年経過して後、大規模津波への対策が次の課題として取り上げられるようになった。防災施設の嵩上げだけに頼ると、建設費の巨額化、建設期間の長期化に加え、日常生活の便利さのためには防災施設を無視した住居配置を図る住民さえ現われ、万全の防災対策とは必ずしもいえない。

昭和58年3月に発表された津波常襲地域総合防災対策指針(案)⁹⁾は、防災施設、防災地域計画、防災体制の三本立てから成り立ち、地域開発計画と調和のとれたものであることと規定したのが第1の要点である。その第2の要点は、計画対象津波によって防災施設の高さが決まるとは限らないと明記したことである。第3に、計画対象津波とは、過去100~150年くらいの間に生じた大規模津波であって、信頼できる痕跡値が多数存在し、津波再現の可能なものを選ぶこととした。

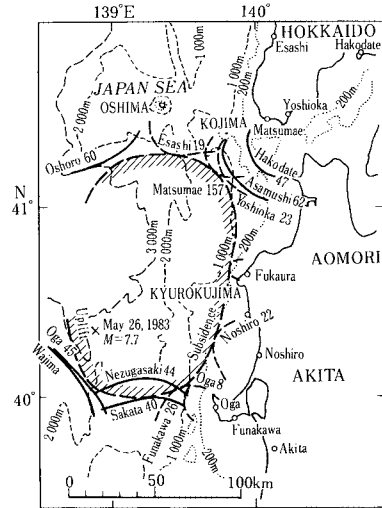
対策を立てるべき地域ごとに、施設、地域計画、体制をその地域の特性に合致するように選定し組み合わせ、大規模津波時にも資産被害を軽減し、人命だけは完全に守ることを目的とする。平均的な姿としては次のようになるであろう。

30年から50年に一度発生する程度の中規模津波に対しては防災施設で完全に防御する。従来の高潮対策、浸食対策でつくられた防災施設も、そのまま、あるいは多少の補強により対応できる規模である。津波浸水の危険地域には重要な施設をおかず、でき得る限り居住地とはしない。水際の建物は堅牢な防浪ビルに作り変えていき、背後を守る一助とする。これが防災地域計画である。防災体制の主な内容は、正しい災害文化の継承、災害時行動の訓練、予警報の伝達、避難行動、および被災後の救援体制とである。

4. 津波初期波形

津波初期波形は実測されたことがなく、数値シミュレーションを行ううえでの最大の問題点の1つである。

波源域の決定には逆伝播図が使われていた。津波来襲地点を点源として線形長波の伝播問題を解き、発震時刻と津波来襲時刻の差だけ経過した時刻の波峯線を描く。数多くの地点からの波峯線の包絡線によって波源域を決



図一4 逆伝播図より求めた波源域(羽島)

める。図一4は羽島が日本海中部地震津波に対して求めた結果である¹⁰⁾。図中に、Noshiro 22と付した点線がある。能代を点源とし伝播時間22分に対する最終波面で、津波初動が下げ波であったことを意味する。実線は上げ波の初動に対応する。波源左下方の×印が震央である。

逆伝播図からは波源域の広がりや初期水位分布の傾向しかわからない。

最近使用されるのは、地震波から推定される断層運動の結果として海底面の鉛直変位を決定する方法である。

地震波には地球内部を三次元的に伝播する実体波(P波とS波)、地球表面に沿って二次元的に伝わる表面波(レイリー波とラブ波)がある。震源位置の決定に、P波、S波の到達時間差が使われることはよく知られている。

各地震波の振幅や位相が断面運動と関連した方向特性をもっていることを利用して断層運動を推定し得るが、断面面としてお互いに直交する2つの解となり、これだけからはどちらが実際の断面面であるかを特定できない。

断層運動の大きさと密接な関係をもつ量として地震モーメント M_0 がある。断面面の大きさ A 、ずれの大きさ D 、岩石の剛性率 μ とすると、

$$M_0 = \mu D A \dots \dots \dots (1)$$

である。 M_0 は震源が点とみなせる程度の、波長の長い地震波の振幅に比例する。断面面の大きさを、余震域の広がりなどから決めればずれの量 D が求められる。

断層運動を記述するに必要な断層パラメーターは、断層の位置、断層の長さや幅、断層の走向、断面面の傾き、ずれの方向や大きさ、であって、このような解析から決定される。

表一1に日本海中部地震について求められた断層パラ

表—1 日本海中部地震の断層パラメーター

モデル	断層長 (km)	断層幅 (km)	断層走向	傾斜角	右横ずれ変位 (m)	縦ずれ変位 (m)	地震モーメント (10^{27} dyne-cm)	K	α
田中ほか	北断層	60	N10°W	20°E	0	-4	2.9	}	0.99
	南断層	30	N15°E	20°E	-3	-5.2	1.9		
相田モデル10	北断層	60	N 5°W	25°E	-0.54	-3.0	}	5.8	1.26
	南断層	40	N22°E	40°E	0	-7.9			
佐竹モデルD-2	北断層	60	N20°W	30°E	0	-4.0	}	7.6	1.14
	南断層	60	N20°E	30°E	0	-5.0			

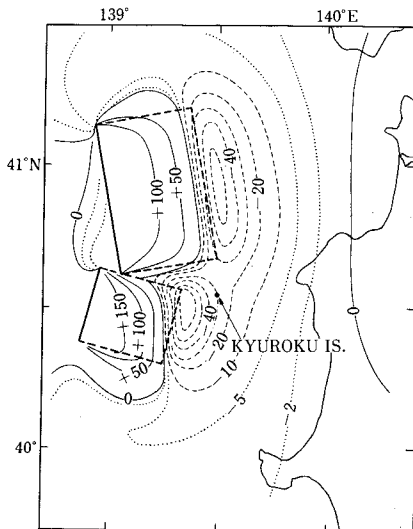
メーターの例を示す。

断層パラメーターが決まると、対応する海底地盤の変位は計算され得る。一樣な剛性率をもつ半無限弾性体としての解が Mansinha-Smylie¹¹⁾ によって与えられており、これを利用すればよい。

図—5 は、田中ら¹²⁾が Shimazaki・Mori¹³⁾の成果に基づいて海底面の鉛直変位分布を求めたもので、最大上昇量は 1.5 m 余である。

地震波から断層運動を求めるにしても、解がたった 1 つ決まるわけではない。利用する地震波の種類が異なると地震モーメントの値が違ふ。表面波からは $6\sim 10 \times 10^{27}$ dyne-cm、実体波から $3.5\sim 5.3 \times 10^{27}$ dyne-cm 程度の値となる。それに加え、断層形状を長方形、ずれの量を場所によらず一定、剛性率も一定、と仮定しているから、地震波解析より得られた結果が津波の挙動を完全に説明するとは限らない。

相田の開発した手法は、地震波から得られた海底地盤

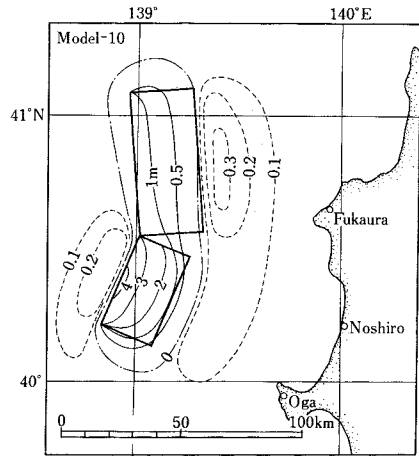


図—5 断層モデルより得られた地盤変動(田中ら)

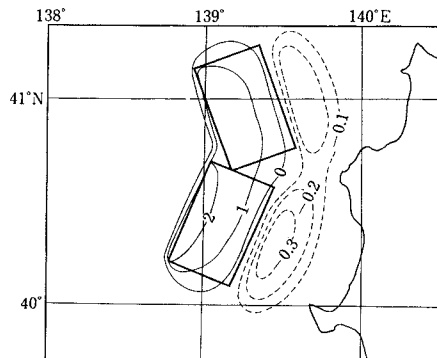
の変位を津波を説明し得るように補正するものである¹⁴⁾。波源にさほど近くない場所の検潮記録を使用する。波源近くでは短周期成分のエネルギーが大きいが、検潮儀周波数特性によってカットされ、正しい波形が得られてない場合が多いからである。計算波形と検潮記録の第 1 波の山と谷に注目し、その振幅比 K_i を多数地点について求めて、その幾何平均を K とする。この値が計算の初期値として選んだ鉛直変位量への補正係数である。さらに、各地点での実測値を一樣に満足せしめていたか否かの指標として、 $\log K_i$ の標準偏差 $\log \alpha$ を使用する。 K や α が 1 に近いほどよい。

図—6 が相田の求めたモデル 10 の結果である¹⁴⁾。最大の鉛直変位が 4 m でなければ津波としては不十分な結果となるわけで、地震のみから得られた田中らの結果と食い違いがある。

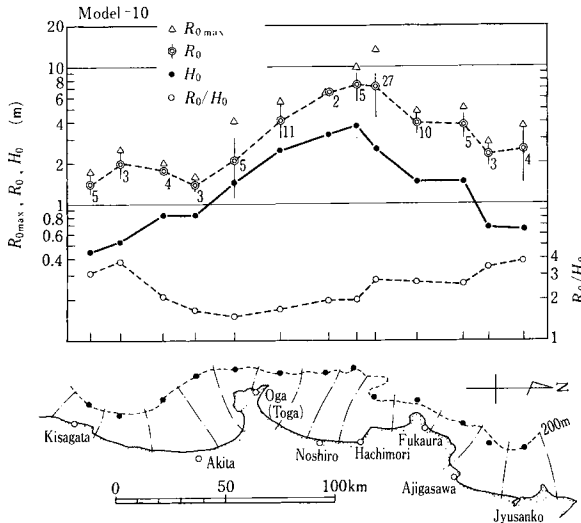
佐竹は遠地の地震波記録から断層運動を決め、検潮記録をも満足するモデル D-2 をつくった¹⁶⁾。図—7 が結果である。最大鉛直変位は約 2 m で田中らのものに近く、相田モデル 10 の半分であるが、断層面積は 1.6 倍、 M_0



図—6 相田のモデル 10



図—7 佐竹の D-2 モデル



図—8 H_0 と R_0 の比較 (日本海中部地震津波の場合)

は 1.3 倍となっている。

K や κ でモデルの良否を判定する場合、先に述べた理由から、波源近くの検潮記録は使用され得ない。この欠陥を補うため、相田は波源近くの打上げ高分布との対比を使用する。深海としてよい水深 200 m 地点での計算波形第一波の全振幅 H_0 を打上げ高と比較する。実際には、海岸に沿って数 km から 10 数 km の小区間に分割し、各区分ごとの実測打上げ高の平均値 R_0 をつくり、対応する H_0 と比べるのである。図—8 において、2 重丸が R_0 、縦線は標準偏差、三角は各区分内の最大値である。これと H_0 を結ぶ実線と比べると分布形状が似ており、 R_0/H_0 が 2~3 の範囲に収まっている。 R_0/H_0 がこの範囲なら、詳細な打上げ計算をする価値のある波源モデルといえることが、過去の経験から判明している。

相田モデル 10 は、以上の検討から推定されたもので、現状では最良のモデルである。佐竹の D-2 は、 R_0/H_0 分布の検討がまだなされていない。

このようにして鉛直地盤変位の大勢が決まり、打上げ高分布を十分な精度で求め得ることになっても、津波波形については疑問が残る。日本海中部地震津波の際、波源に近い青森県深浦の水深 50 m 地点に設置されていた超音波高計が第 1 波の立上り部分を捉らえた。かなり急な立上り方をしており、相田モデル 10 では説明できず、今までいわれている断層面と直交する急な傾きの面を主断層面を選ぶか、あるいは主断層面に共役な大規模な副断層があったと考えざるを得ない。しかし、余震域の分布等からこれを支持する資料はなく、謎は深まるばかりである¹⁷⁾。

5. 近地津波の数値シミュレーション

津波の場合、200 m 以深を深海、以浅を浅海として差し支えない。

深海における津波は、完全流体に対する線形長波の式で計算する。波源での初期値は、瞬時に海底地盤変位が発生したとおいても、1~2 分間で全変位が完了するとしても、波源域が大きい限り、津波発生能力には差は生じない。

浅海の計算には、移流項や海底摩擦項が不可欠で、これらを含んだ浅水理論が使用される。水平渦動粘性項などは、津波の水位が主対象であるならば、無視しても十分な精度の解が得られる。

解析解の集合で現実問題の解を得ることは、波形や地形の複雑さからして有効でなく、数値解によらざるを得ない。

津波は平面的な広がりをもっており、影響される沿岸域の長さも大きいから、計算対象領域は非常に広い。精度を上げるためには、空間格子、時間格子の寸法を小さくとらねばならない。地形と津波の干渉が完成するのは第 3 波以降であるから、少なくとも第 5 波くらいまでは計算で復元したい。この結果、必要とされる計算機容量は膨大なものとなる。

計算領域に太平洋全域を入れるわけにはいかない。海側のどこかに境界を設定することとなる。これが沖側境界である。もちろん、波源域を横切ってはならない。ここでは波が通過するという条件をおく。線形理論で扱える場所であるから特性曲線を利用すると容易に満足させ得る。

陸上での境界条件は難しい。もし、水位の上昇下降に伴って陸上へ出入する水量が波長全体の有する水量に比べて微々たるものであり、出入水平距離が波長に比べて問題にならない長さであり、しかも沖合の波形しか議論の対象としないのであれば、汀線に鉛直壁を設置して計算すればよく、境界条件は簡単なものとなる。

しかし、津波被害の主な発生場所は陸上を含む汀線近傍であり、津波波長が地形変化の寸法と同規模、周期が短い流れの時間的・空間的変化は大きく、陸上での水の運動経路が複雑な場所である。移動境界の表現が結果を大きく左右する。

陸上境界条件を厳密に解くことはできるが^{18),19)}、実用計算には不適であり、先端に堰公式を仮定するもの²⁰⁾、一格子背後の条件で代用するもの²¹⁾などがあり、打上げ高に限るならば良好な結果を生ずる。その代わりに、境界が移動する付近の空間格子寸法 Δx は、その斜面勾配 α 、津波周期 T 、重力の加速度 g との間に次の関係を満たすように決められないと計算打上げ高が小さくなって

しまう²²⁾。

$$\Delta x \leq 4 \times 10^{-4} \times a g T^2 \dots\dots\dots (2)$$

もちろん、通常の C.F.L. 条件も満たされなくてはならない。

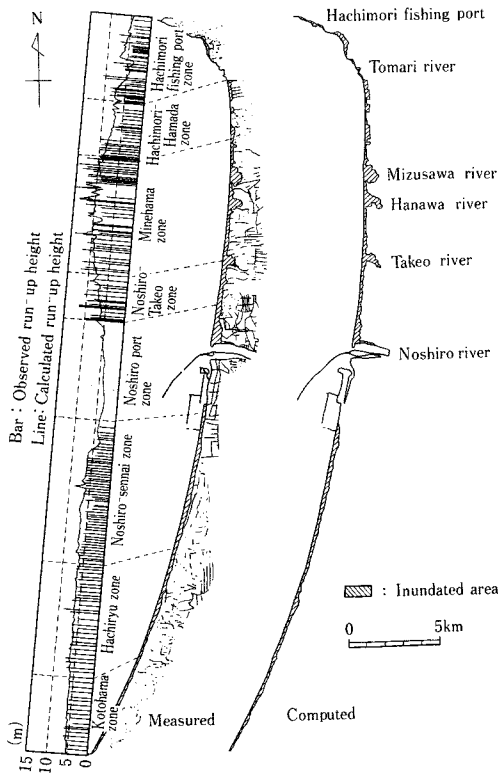
この2つの条件のほかに、津波波形を精度よく表現するための条件を付け加える必要がある。津波1波長間に存在する空間格子点数 N の大きさがこれである。 N が大きいほど、波形はよりよく表現される。しかし、空間格子数が多くなりすぎると打ち切り誤差の集積が無視できない大きさとなって正しい波形が得られない。試行の結果、 N は20~30が適当であることがわかった。したがって

$$\frac{\sqrt{gh} T}{\Delta x} = 20 \sim 30 \dots\dots\dots (3)$$

という条件が満足されるように Δx を決めればよい²³⁾。

このほか、 Δx の決定に際して考慮すべきものに、海底地形の変化の寸法との関係があろう。空間格子寸法が大きすぎると、当然あり得べき屈折効果を見逃してしまうかもしれない。現在では、この点に関する基準は得られていない。

いずれにせよ、深海では空間格子を大きく、浅海では



図—9 秋田県北部海岸での日本海中部地震津波（左図の縦線は実測値、折線は計算値打上げ高、中央は実測浸水域、右図は計算浸水域）

小さくとる。このとり方を指数関数的に変化させるとか²⁴⁾、FEMを採用する²⁵⁾、なども使用されたことがあるが、前者はあまりにも技巧的に過ぎ、後者は計算時間がかかりすぎる。

日本海中部地震津波に対する計算例を図—9に示す²³⁾。15 m に近い最大打上げ高が能代北方の峰浜村で認められた。男鹿半島の北に55 kmの長さをもつ平滑な砂浜海岸の砂丘上の地点であり、従来どおりの津波計算では再現できなかった。たとえば文献15)によれば、最大打上げ高は7 m未滿にしかならない。文献23)では、 N が20~30という条件を満たすように細かな格子を選んだ。従来の格子に比べ1/3~1/5の大きさである。この結果が図—9で、実線が計算値、縦棒が実測値である。最大打上げ高発生場所が1 kmほどずれているが、打上げ高としては完全に一致している。計算値と実測値の比は0.8と1.2の間にあり、区域全体の平均では1.04、分散は0.057であった。

使用した基本式は海底摩擦を含む浅水理論で、後でふれる分散項は含まれていない。よい一致が得られた原因は空間格子を細かくしたことにある。波形表現が正確になったのもさることながら、海底地形の効果が十分に取り入れられたからである。図—10がこのことを物語っている。波源域から出発する波向線が峰浜村（図中矢印の箇所）の海岸へ収束していく状況がみられ、水深100 m以深の地形がその原因であることが読み取れる。

波形をよりよく表現しようと努めたのが、たまたま地形の効果を十分に取り入れることにつながったのである。

6. 被災推定法

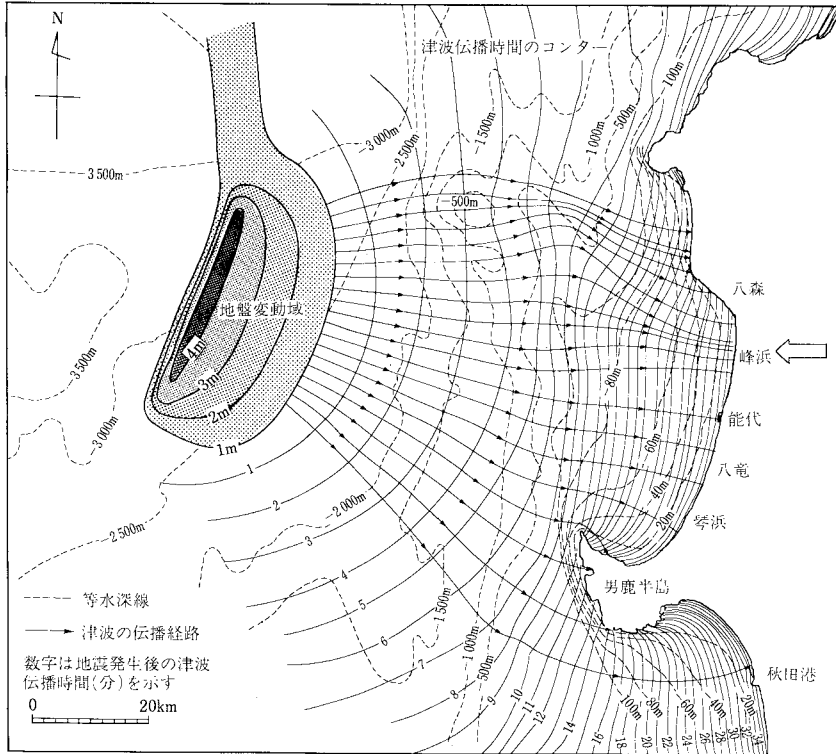
津波の外力としての最大値（たとえば最大浸水深）を使って被害を推定する概算手法と、津波数値計算と連動しながら時々刻々の災害の経過をたどっていく数値シミュレーションがあるが、いずれもまだ完成の域に達したものは存在しない。以下に、そのうちの若干を紹介する。

(1) 避難シミュレーション

津波危険地区から安全に避難し得るか、安全に避難させるための対策は何かを考えるための数値シミュレーションが数例実施されている。

第1の例²⁶⁾では、まず津波数値計算から津波来襲時刻と浸水範囲を求める。地震発生と同時に避難行動が開始されるものと想定し、浸水区域外や避難ビルに津波来襲以前にたどりつければ安全と判定する。人間の避難行動には火災を対象としたモデルを準用している。

第2の例²⁷⁾では、避難行動開始時点の相違による被災率の差を検討している。行動開始のきっかけは、地震、



図一10 日本海中部地震津波の屈折図

津波警報，現実に津波を認めたことの3種類とし，情報の伝達経路としてマスコミ放送，市町村同報無線，消防団経由などを組み合わせる．日本海中部地震津波での実績を調べ，これに基づいたシミュレーションとなっている．

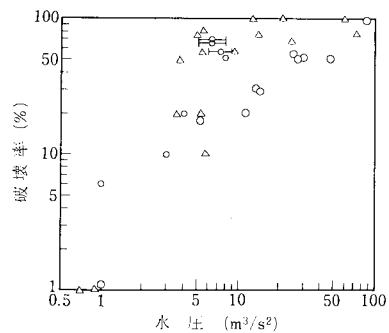
(2) 家屋

木造家屋の被災判断基準として，昭和8年の実績から，1.5mの浸水で家屋は半壊，2m以上で全壊，などが示されていた²⁸⁾．

昭和35年チリ津波での実績は，家屋被害の程度を浸水位と家屋の構造種別とに関連づけて報告されている²⁹⁾．

このとき，コンクリート造建物は海水面下に没するほどであっても全く倒壊しないと報告されていることは，それ以前の経験とも一致する事実を明確な形で述べたものであり記憶に値する．

家屋の被害は，浸水深で代表される浮力によるのみでなく，流水力が重要であるとする考えがある．抗力係数を不問にするならば，水没深と流速の二乗の積が重要な支配因子であろう．図一11はその例である．流失・全壊戸数 a ，半壊戸数 b ，床上・床下浸水戸数 c とすると，家屋破壊率は $(a + b/2)/(a + b + c) \times 100$ で定義される．図中，白丸は羽鳥がチリ津波に対して³⁰⁾，黒丸は相



図一11 家屋の破壊率

田・羽鳥が1944年東南海³¹⁾，1946年南海道³²⁾，チリ津波³³⁾，に対して求めたものであり，三角は日本海中部地震津波での結果である³⁴⁾．

図一11は水圧だけで説明できないことを物語っている．高橋は，洪水による被災と津波によるものとを比べ，津波の方が被災しやすく，非正常性の効果であろうと考えている³⁵⁾．柱状構造物の設計で考慮されている加速度項というよりは，津波先端が巻き波砕波のごとき形態をとることによる衝撃的な力が重要であるに違いない．

さらに重要なものとして漂流物の衝突があり，チリ津波時の経験から，径60cmくらいの流木が衝突すると

木造家屋は破壊されたといわれている。

こうした効果を含めた判定基準はまだ存在しない。

(3) 木材の流出

過去の津波時には流木が家屋を破壊し、構造物に損傷を与え、人間への殺傷力となっている。静岡県対策にみられるように流出防止の手段が現実には施工され始めているが、流出開始の条件、流出木材の運動や衝突時の作用力についての研究はまだ始まったばかりである²⁶⁾。

後藤の行った木材流出のシミュレーションは次のとおりである²⁷⁾。津波水流にのった木材の運動を1本ずつ追跡していく。運動経路を、まず水流との相対運動に関連する抵抗や付加質量力を考えに入れた運動方程式を解いて与える。必要な諸係数は実験と理論的考察から定められた。このようにして、木材の平均的な位置が決定論的に求められる。

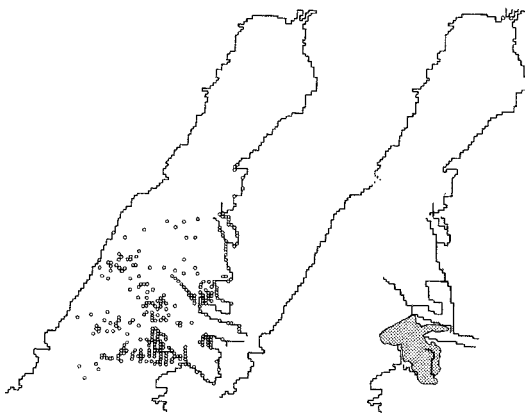
拡散の効果で平均的な位置からのばらつきが生ずるとし、確率論的に取り扱う。実験との比較から、このばらつきは正規分布をすとされた。

図一12がその結果の一例である。図中の印は、少なくとも1本以上の木材が存在する格子を示している。2か所の陸上貯木場、1か所の水面貯木場に合計6000本の木材(径1m、長さ10m)の南洋材があったものとしており、流出開始後80分での模様である。

(4) 石油の流出

津波が主因となって大規模な石油流出が生じた例はわが国ではまだないけれども、1964年アラスカ地震でのValdez, Seward, Whittierのタンク火災は津波が主因であったらしい²⁷⁾。地震で石油タンクが破壊、津波で石油が運ばれ火災を広げる役割を果たしたものとしては、昭和39年新潟地震での例がある²⁸⁾。

石油流出は巨大タンカー事故などに関して研究されており、重力・慣性力領域、重力・粘性力領域、表面張力・



図一12 木材(左)と石油(右)の流出

粘性力領域、極限領域それぞれに対し、石油が円形に広がるのと仮定のもとに、広がり面積を与える経験式が存在する⁴⁰⁾。

後藤は、津波時の石油流出の問題を初めて数値計算した⁴¹⁾。石油に対する連続の式、運動の式を水に対するものと連立させて解いていく。石油先端部での形状抵抗、石油・水界面での抵抗、石油が海底に達しているときの底面での抵抗、をどのように見積るかが、最大の問題となる。

図一12が計算例である。 $\rho=0.91\text{ g/cm}^3$ 、 $\nu=43\text{ cSt}$ のB重油が、1000 m^3 ずつ2つのタンクに貯蔵されており、地震とともに亀裂が入って漏出したものの防油堤内にとどまっていたが、津波が防油堤上を越えたため流出したと仮定されている。まだ表面張力は無視され得る時間内での広がりである。計算された広がり、上記経験式の与える面積を少し上回るものとなっている。

7. 近い将来の課題

昭和58年日本海中部地震津波は穏やかな白昼の出来事であったから、多数の目撃者や証拠写真がとれ、津波の素顔が明らかにされた⁴²⁾。従来の理論では解析できないと考えられる現象もあり、研究が急がれている。また、ほとんど時を同じくして提出された津波常襲地域総合防災対策指針(案)によれば、防災施設を越えて計画津波が浸入することもあり得るとしているから、このような事態でも被災を軽減するための方策についての研究が必要となる。以下に、日本海中部地震津波に関連する3課題、対策手法上必要となるもの4課題について概説しよう。

(1) 検潮記録の補正と記録方法の改善

検潮井の水利フィルターを計算⁴³⁾、あるいは実測⁴⁴⁾によって求め、検潮記録を補正しようとする試みがあるが、失われてしまった成分は復元不可能である。津波専用の観測は皆無に等しい状況であるうえに、もし多数配置できたにしても維持管理が十分に行われるとは期待できない。津波の発生頻度は小さいから、常時使用されていない計器類は管理が行き届かないおそれがある。

現在存在する超音波波高計の出力を24時間連続して記録し、もし特筆すべき現象が発生しないときには波浪観測に必要な資料をとりまとめたうえで、記録を消去して磁気テープを再使用するのが、最も実現しやすい方法であろう。可能ならば、現存する検潮井を利用して、その外側の水位を上記と同種の方法で測定し、日常時は波浪や検潮井特性の較正のために使用しながら維持管理するのも、1つの手段である。

いずれにせよ、津波の波形が今後の大問題であり、信頼できる観測値が不可欠である。

(2) 基本方程式の近似度

日本海中部地震津波では、周期 10 秒程度のソリトン波列が津波先端部に存在した。過去にも同種の波の存在を示唆する記述はあったが、写真やビデオで確認されたのはこれが最初である。

分散項とよばれる高次項を方程式に入れなければならない。一次元計算のための方程式はあるけれども、汀線付近での精度が悪い。二次元計算に使うこととなると、分散項計算の手間は莫大なものとなり、しかも、空間格子寸法を数 m の大きさに選ばなくてはならない。

陸上に上がる前に短周期波は砕波してしまうので、最大打上げ高にはあまり大きな影響をもたないが、沿岸構造物への外力としては厳しいものとなる。

(3) エッジ・ボア

秋田県北部海岸に捕捉された日本海中部地震津波は、この海岸に沿って往復し、その先端は砕波段波となっている、いわゆるエッジ・ボアとしての特性を示した。エッジ・ボアは、波峯方向のエネルギーの流れが大きく、通常の屈折法則に従うとは限らない。エッジ・ボアの実験例は少なく⁴⁵⁾、理論的解明も進んでいない。

(4) 津波波形再現の精度向上

防災施設を乗り越えて津波が氾濫し得るから、そのときの浸水区域の大小は津波波形いかにかわってくる。現地での波形再現精度の検討は、初期波形の不確定さ、比較対象となる検潮記録が少なく、しかもフィルターがかかっていること、の 2 点のため、近い将来には実行できない。大型水理実験がこの代わりとなる。

特に大型防災施設の周辺域などでは波形も流速も数値計算では精度よく再現できていないのが現状である。

また、流速の再現精度については今までにみるべきものがなく、すべてこれからの問題として残されている。

(5) 防災施設の設計条件と維持上の問題

従来は、構造物を越える津波を想定していなかった。しかし、たとえ計画津波が越えない高さであったとしても、それを上回る津波は、確率が小さくとも、来襲し得る。高さ 10 m の防潮堤を、さらに 5 m もの越流深で 3 分間流入するといった現象が生じた場合、防潮堤がどうなるのか、誰もその答えを知らない。

もし、防潮堤が健在であったとしたとき、堤内地にたまった水を排除する手段が講じられていない所もある。

軟弱地盤上の巨大な三面張りの堤防は、老朽化して内部が空洞化しているかもしれない。簡便で信頼できる探査法はないものであろうか。

(6) 被災推定法の開発とそれに基づく処置

津波はまれにしか生じない現象である。その間に沿岸地域は大きく変容する。過去と違った規模の災害、過去に例をみない災害が生じ得る。これらに前もって対処す

るため、被災の機構を明らかにし、その過程を模擬できる手法を開発することが望まれる。その結果を危険区域の指定などに活用し、津波に強い沿岸市町村を作り上げたいものである。

数多くある対象のなかで、最も緊急の課題は漁船の処置であろう。現在の方針は、大型船は沖出し、小型船は陸へ上げて固縛、となっているが、必ずしも万全の策とはいえない。安全水深へ到達する前に津波に出会うと遭難の機会が増え、流出した漁船は危険外力に変化する。FRP 船は一部破損したとき部分的修理がきかないこともあり、漁船の被災は津波被害のうち個人資産への打撃がきわめて大きい問題である。

(7) 量的な津波予警報

震災後数分から 10 数分で津波予報が出されている。その内容は大津波の場合、高い所で約 3 m 以上に達する見込み、となっている。しかし、3. でも述べたように、日本各地の沿岸では、大潮・津波・浸食対策のいずれかによって、5~6 m の高さの堤防が作られているから、津波予報が必ずしも避難行動に結びつくとは限らない。

津波警報が出されると、地元の防災担当者は、いつ、なにを根拠として、避難命令または勧告を出せばよいのか判断に苦慮している。住民は高台へ集まるよりも屋内でテレビ等の次の情報を待つようになった。

津波は場所により大きな差がある。沿岸平均としては 5 m でも、大きい所では 10 m 以上になる。平均的な値より、局地的な値の予報と伝達がなされなくてはならない。

三陸地方を対象に、最終空間格子を 200 m に選んでも、スーパー・コンピュータを使用すれば、津波の計算は 3 分程度で終了する⁴⁶⁾。断層パラメーター、特に断層の面積が発震後早期に決定できれば⁴⁷⁾、避難に役立つ津波数値予報も夢ではない。

8. 結 語

昭和 58 年は、日本海中部地震津波が津波の新しい側面を明らかにして問題を提起し、津波常襲地域総合防災対策指針(案)が提出されて将来の方向を指し示した年であった。

浸水高のみに限るならば、数値計算は実用に役立つ数字を提供できるほどに完成した。

津波の詳細な挙動を明らかにし、被災の機構とその規模推定法を研究し、その成果を防災地域計画に生かして津波に強い沿岸地域をつくり、さらに少なくとも人命だけは安全に守り抜く方策を作り上げるのが津波防災工学のこれからの課題である。

参 考 文 献

- 1) 羽鳥徳太郎：歴史津波——その挙動を探る——イルカぶっくす，p.125，1977.
- 2) 牧野 清：八重山の明和大津波，p.462，昭和43年.
- 3) Horikawa, K. and Shuto, N. : Tsunami disasters and protection measures in Japan, *Tsunamis—Their Science and Engineering*, pp.9~22, 1983.
- 4) Iida, K. : Magnitude and energy of earthquakes accompanied by tsunami, and tsunami energy, *J. Earth Sci., Nagoya Univ.*, 6, pp.101~112, 1958.
- 5) Soloviev, S.L. : Recurrence of tsunamis, *Tsunamis in the Pacific Ocean*, East-West Centre Press, pp.149~163, 1970.
- 6) 震災予防評議会：津浪災害予防に関する注意書，たとえば宮城県昭和震嘯誌，pp.451~460，昭和10年.
- 7) 山口弥一郎：津波常習地三陸海岸地域の集落移動，山口弥一郎選集第六巻，世界文庫，pp.331~430，昭和47年.
- 8) 防災科学技術センター，災害危険区域条例集——出水・津波・高潮——，防災科学技術研究資料，第49号，p.21，昭和55年.
- 9) 建設省河川局：津波常襲地帯総合防災対策調査報告書，昭和58年.
- 10) 羽鳥徳太郎：1983年日本海中部地震津波の規模および波源域，地震研究所彙報，Vol.58，pp.723~734，1983.
- 11) Mansinha, L. and Smylie, D.E. : The displacement fields of inclined faults, *Bul. Seismological Soc. America*, Vol.61, No.5, pp.1433~1440, 1970.
- 12) 田中和夫ほか：日本海中部地震の特性，科研費成果報告，1983年日本海中部地震による災害の総合的調査研究（研究代表者：乗富一雄），pp.39~45，昭和59年.
- 13) Shimazaki, K. and Mori, J. : Focal mechanism of the May 26, 1983 Japan Sea earthquake, 地震学会講演予稿集，1983-No.2, p.26, 1983.
- 14) Aida, I. : Reliability of a tsunami source model derived from faults parameters, *J. Phys. Earth*, Vol.26, pp.57~73, 1978.
- 15) 相田 勇：1983年日本海中部地震津波の波源数値モデル，地震研究所彙報，Vol.59，pp.93~104，1984.
- 16) Satake, K. : The mechanism of the 1983 Japan Sea earthquake as inferred from long-period surface waves and tsunamis, *Phy. Earth Planetary Interiors*, Vol.37, pp.249~260, 1985.
- 17) 相田 勇：1983年日本海中部地震津波の波源モデル，海洋科学，Vol.16, No.9, pp.496~502, 1984.
- 18) 後藤智明・首藤伸夫：非線形津波の二次元遡上計算，第26回海講，pp.56~60，1979.
- 19) Takeda, H. : Numerical simulation of run-up by variable transformation, *J. Ocean. Soc. Japan*, Vol.40, No.4, pp.271~287, 1984.
- 20) 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，Vol.52，pp.441~460，1977.
- 21) 岩崎敏夫・眞野 明：オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算，第26回海講，pp.70~74，1979.
- 22) 後藤智明・首藤伸夫：各種津波遡上計算法と波先端条件の比較，第27回海講，pp.80~84，1980.
- 23) Shuto, N., Suzuki, T., Hasegawa, K. and Inagaki, K. : A study of numerical technique on the tsunami propagation and run-up, 国際津波シンポジウムにて口頭発表，1985.
- 24) Houston, J.R. and Butler, H.L. : A numerical model for tsunami inundation, WES, Tech. Rep. HL-79-2, 1979.
- 25) Iida, K., Suzuki, T., Inagaki, K. and Hasegawa, K. : Finite element method for tsunami wave propagation in Tokai district, Japan, *Tsunamis: Their Science and Engineering*, AEPS, pp.293~301, 1983.
- 26) 消防科学総合センター：地震被害予測システム研究開発報告書——津波による浸水及び避難について——，161 p., 昭和59年.
- 27) 国土庁：日本海中部地震の総合的調査報告書，188 p., 昭和59年.
- 28) Nasu, N. : Heights of tsunamis and damages to structures, 地震研究所彙報別冊第1号，pp.218~227, 昭和9年.
- 29) 佐々木忍：チリ地震津波について，第7回海講，pp.275~287，昭和35年.
- 30) Hatori, T. : A study of the damage to houses due to tsunami, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol.42, pp.181~191, 1964.
- 31) 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，Vol.57，pp.337~350，1982.
- 32) 相田 勇・羽鳥徳太郎：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，Vol.58，pp.667~681，1983.
- 33) 相田 勇・羽鳥徳太郎：大船渡市街に遡上した津波の数値実験，地震研究所彙報，Vol.58，pp.175~185，1983.
- 34) 漁港漁村建設技術研究所：昭和60年度日本海中部地震津波対策調査資料，p.95，昭和60年.
- 35) 高橋 保・中川 一・加納茂紀：洪水氾濫による家屋流失の危険度評価，京大防災研年報，第28号B-2，pp.455~470，昭和60年.
- 36) 堀川清司：浮遊物の衝突による破壊力，科研費研究成果，No.A-58-2，pp.85~92，昭和58年.
- 37) 後藤智明：津波による木材の流出に関する計算，第30回海講，pp.594~597，昭和58年.
- 38) Selkragg, L.L., Preuss, J. et al. : Earthquake Hazard Mitigation, The Alaska Case, 332 p., 1984.
- 39) たとえば，消防庁：新潟地震火災に関する研究，224 p., 昭和40年.
- 40) たとえば，土木学会：水理公式集，pp.591~592，昭和60年.
- 41) 後藤智明：津波による油の拡がりに関する数値計算，土木学会論文集，第357号，II-3，pp.217~223，1985.
- 42) たとえば，首藤伸夫：秋田県北部海岸における日本海中部地震津波，第31回海講，pp.247~251，昭和59年.
- 43) 谷本勝利ほか：1983年日本海中部地震津波の実態と二，三の考察，港湾技研資料，No.470，299 p., 1983.
- 44) 渡辺偉夫・岡田正実・横田 崇・網野正明：検潮記録と津波波高に関する研究，昭和58年日本海中部地震に関する

- る緊急研究報告書, 科学技術庁研究調整局, pp.135~147, 昭和59年.
- 45) Divoky, D. : Edge bores, TT-P-282-73-1, 53 p., Tetra Tech, Inc., 1973.
- 46) Goto, C. and Shuto, N. : Accuracy and speed of numerical simulation as a means of tsunami forecasting, 国際津波シンポジウムにて口頭発表, 1985.
- 47) 泉谷恭男・平沢朋郎: 加速度記録を用いた断層パラメータ即時的推定の試み, 地震学会講演予稿集, 1985, No.1, p.116, 1985. (1986.1.25・受付)
-