

津波研究の現状と津波対策*

首 藤 伸 夫**

Present State of Tsunami Research and Defense Works

Nobuo Shuto

最近, 数値計算が発達したため, 津波の事は全て判ったとの誤解が生じているようである。しかし, 津波の実像を知る上で様々な難問題が残されている。まず, 出発点である津波初期波形が一義的に決まらない。計算途上で不安定が起こり易く, また誤差の集積が結果の精度を落としかねない。計算結果の検証にあたっては, 潮位記録にはフィルターがかかっている事, 津波痕跡は往々にして大きい値のみが測定されており良い検証材料とは言えない場合もある事, 等の問題がある。

我が国の津波対策は, 3つの方策を組み合わせで行われる。ハードな対策としての構造物, ソフトな対策としての防災体制, そして防災地域計画である。

Recent development of tsunami numerical simulation causes misunderstanding that everything about tsunamis is well understood. There are many difficulties in revealing the real faces of tsunamis. At the beginning, the tsunami initial profile is not uniquely determined. During computation, instability may occur and numerical errors may be accumulated to deteriorate the results. For verification, tide records are often filtered and tsunami traces which are usually obtained to show high runup heights do not always provide good information.

Tsunami defense works in Japan consist of three countermeasures from hard ware to soft ware; structures, regional planning and prevention systems.

キーワード: 津波, 津波数値計算, 津波対策, 津波観測

1. はじめに

津波, 特に災害につながる津波は滅多に発生しない。しかし, ひとたび発生すると, その影響は極めて大きい。津波研究の困難さも, 津波対策の難しさも, この二点から生じている。

稀にしか発生しないから, その実態はほとんど判っていない。手がかりは, 津波の残した痕跡, 経験者の体験談や古文書, 数が少なくしかも歪んだままの検潮記録, 少数の写真やビデオしかない。これらに基づいて, 生きて動いている津波を推定しなくてはならない。津波の全貌どころか局所的な姿や動きさえ, 明らかにするのは難しい。

津波を知る手段の一つとして, ここ20年の間に発達してきたのが数値計算である。最近では, 津波が発生すると一週間も経たない内に, 津波伝播のコンピューター・グラフィックス画像が放映される。すると, 津波の事は全て判ったかのような気持ちになる。ここに大きな誤解

の生ずる原因がある。

この小文では, まず数値計算を通じて津波の実態が判るのかどうかを主なテーマとして, 津波研究の問題点を議論することとする。

さて, 現実には津波対策が進められている。わが国は, 世界でも第一級の対策が講じられていると言って差し支えない。どのように行われつつあるか, その現状と将来を概観した後, 近い将来に解決すべき問題点を論ずることとする。

2. 津波の実態は理解できているのか

2.1 初期波形が判らない

全ての出発点は津波初期波形である。地震波形から逆算して, 断層運動を知ることができる。断層の位置, 走向, 断層面の長さや幅, 断層面の傾き, ズレ動いた方向と大きさ等, いわゆる断層パラメタが決められる。最近では, 地震発生から3時間も経つと, いろいろな研究所・研究者が求めた断層パラメタが電子メールで伝えられてくる。

断層パラメタを使うと, 最終的な海底表面の地盤変位

* 1997年6月23日受領, 1997年10月16日受理

** 東北大学工学部附属災害制御研究センター

が計算できる。この鉛直変位と同じだけ海水面が変位して津波初期波形となる。

この過程に問題が存在する。まず、断層パラメタが一意的には決まらないことである。どの位置の、どの地震計の、どの周波数帯域の地震波を使ったかで解が異なる。

第二の問題点は、地震波と津波初期波形とが直接には対応しないことである。地震→津波ではなく、地震→地盤変位→津波と、間に地盤変位が介在する。地震に伴う地盤変位は津波ごと、場所ごとに異なり、地震と一意的な関係で結ばれるとは限らない。地盤鉛直変位を求めるに当たっての仮定は、一様な剛性率を有する半無限弾性体の中での断層運動であるが、これがいつも成立している訳ではないのである。

例を二つあげよう。Fig. 1 は1983年日本海中部地震津波の初期波形を地震波の逆算から田中ほか (1983)¹⁾が求めたものである。しかし、これでは津波エネルギーを説明できないとして、相田 (1994)²⁾が修正したのが Fig. 2 で示す相田モデル10である。最高鉛直変位は前者1.5m、後者で4 mであるから、ここで2倍以上の差が生じている。

こうした違いの他に、能代周辺への津波到達時間は、相田モデル10でも説明できなかった。計算値より10分も早く襲来したのである。この説明のために相田が考えたのがモデル19で、最高水位が西側ではなく東側に存在す

るものである。これは西下がりの断層であるというに等しく、余震分布などと矛盾するため、受け入れられなかった。そのため、早い津波到達を説明するには他の機構を考える必要に迫られたのである (Shuto *et al.*, 1995)³⁾。

次の例は、1993年北海道南西沖地震津波である。初期波形が複数提案されているが、その中から代表的なものを三つ選んで Fig. 3 に示す。左図は地震直後に出版されたハーバード大学の CMT 解に基づく初期波形で、断層は一枚と考えている。中図は菊池 (1993)⁴⁾が求めた三つの断層運動からなるとした解に基づいて計算されたものである (Takahashi *et al.*, 1995)⁵⁾。この二つは地震波のみから求められているが、これでは沿岸の津波を十分には説明できない。

断層運動、奥尻島の地盤変位、沿岸各地での津波を同時に満たすようにと、試行錯誤がまだ続いているが、右図はその一例である (Takahashi *et al.*, 1995)⁵⁾。

ところが、北海道西岸の大成町や瀬棚町では、Fig. 3 に示される断層のいずれによっても到達時間を説明出来ない津波が来襲した。津波の襲来が早かったため、漁船の処置に走った人が遭難している。この早く来た津波も、発生機構が解明されていない。岸近くの海底で地滑りが誘発されたのかもしれない。これ以上に原因不明の水位変動が、北海道の厚田から初山別にかけての海岸で体験されている (後藤ほか, 1994)⁶⁾。第一波が到達する前、30分以上にわたって、50 cm ほどの水位低下が続いたのである。いったい何故こんな事になったのか、解明の手

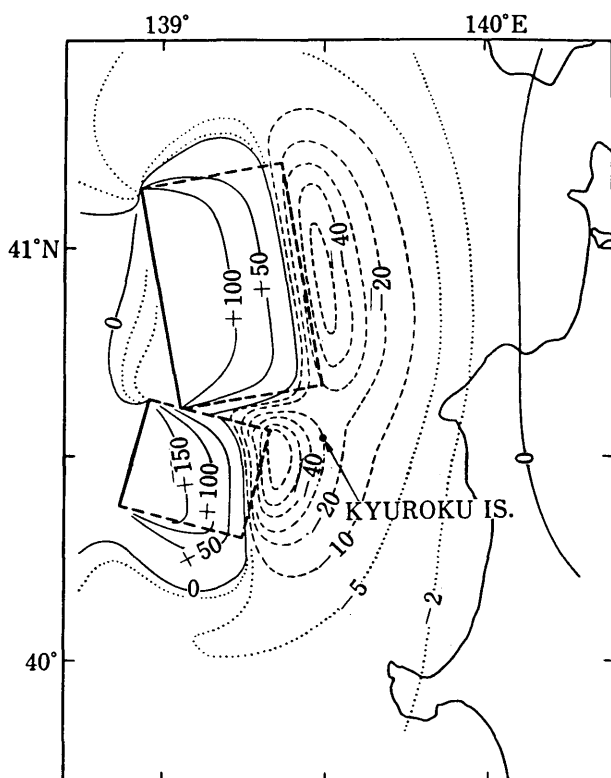


Fig. 1 1983年日本海中部地震津波の初期波形 (田中ほか)

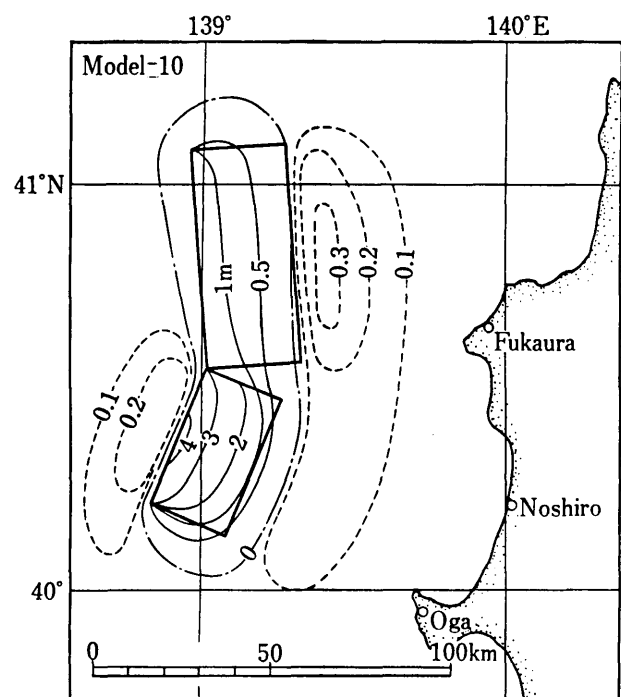


Fig. 2 1983年日本海中部地震津波の初期波形 (相田モデル10)

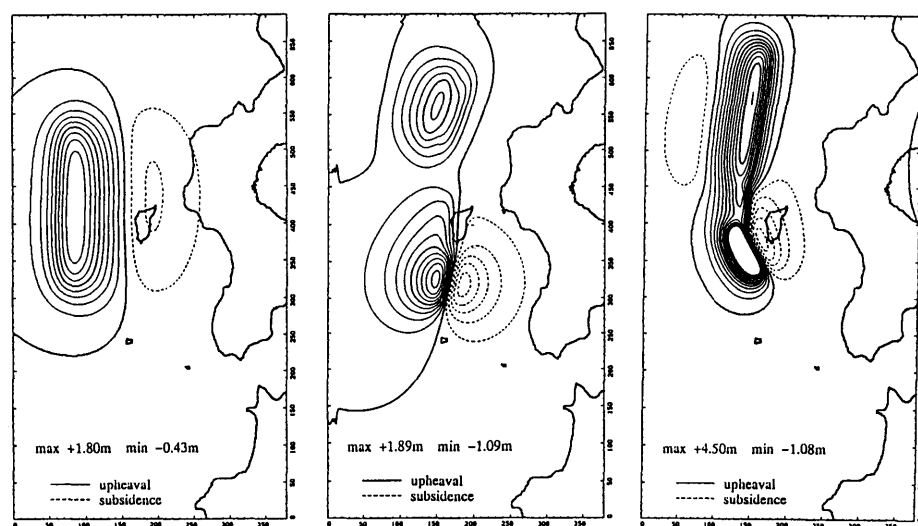


Fig. 3 1993年北海道南西沖地震津波の初期波形。左：ハーバード大学，中：菊池，右：東北大学

がかりさえない。

このように、観測例が増えるにつれ、津波初期波形には判らないことが数多く残されていることを、改めて認識させられるのである。

2.2 使うべき方程式は何か

発生時の津波は波長が数10 km 以上で、そこでの水深は数 km しかないから、長波として扱える。また、深海における波高は数mで、水深や波長に比べて微小である。このことから、深海では微小振幅長波とみなし、線形長波理論を用いる。

岸近くに来ると、波長は長いが波高は水深と同等、あるいはそれ以上になる。従って、非線形性を取り入れなくてはならない。海底摩擦も無視できなくなる。海底摩擦を含んだ浅水理論が使用される。線形理論との分かれ目は、大まかに言って水深50m位であろう。もし、水深200m位で切り替えれば、何の心配も要らない。

海底摩擦を含んだ浅水理論は適用範囲が広く、砕波段波にも適用されている。ただし、段波先端で起こりやすい数値不安定をうまく押さえこむ必要がある。

段波のもう一つの形態である波状段波には浅水理論は適用できない。波状段波が見られるのは主に河川内であるが、浅い水深が長く続く海岸近くでも発生する。ところが、深くても水面勾配が十分峻しければ発生する。海で発生した波状段波の証拠は1983年日本海中部地震で写真及びビデオに撮影されている。この現象を扱うには、分散効果が考慮されたブーシネスク方程式、さらにはもっと非線形性の強い後藤の式などを使用する必要がある。だが、1次元問題ならともかく、平面的な広がりを持つ場でこれらの方程式を解くのは難しい。

波状段波の先端が砕波し、伝播とともに又再生する現

象に対しては、理論的にはまだ扱えない。沿岸での津波が、「畳を積み重ねる様にやってきて高まる」と表現されるのは、波状段波が砕波しながら水位が高くなっていく状況の事であると思われるが、これを数値計算で再現した例はない。ただ、本来の津波の周期が5分以上であるのに比べ、波状段波を構成する短周期波は周期10秒程度と短い。そのこともあってか、最終的な津波遡上高の大小にはほとんど関係しないようであるが、構造物への波力という点からは見過ごすことが出来ない。

日本海中部地震津波ではエッジ・ボアが発生した。時として水深を無視して進行し、従来の屈折法則に従わないことがある。こうした波があり得るとは想像されていたが、現実に確認されたのは初めてであった。これに適用できる理論は存在しない。土木研究所での水理実験(宇多ほか, 1988)⁷⁾によると、わずかな境界条件の違いで、波形が大きく異なることが判明した。打ち上げ高としては大差は生じないようであるが、波力は大きく変化することに違いない。

北海道南西沖地震津波の最高打ち上げ高は、海崖に開けた、入り口幅50mの狭い谷で生じた。入り口での津波痕跡は22m程度、ここから50m奥で31mを越えている。浅水理論を使用した数値計算では、この再現に成功していない。最高値をあわせようとすると入り口での値が高すぎ、入り口での値をあわせると奥の値が大きくなるのである。このような急速な変化の再現には、鉛直加速度を十分に取り入れる必要があると思われる。長波系の理論では難しいであろう。

2.3 差分化誤差 (Shuto, 1991)⁸⁾

微分方程式を現実の条件下に解析的に解くことは出来ない。代わりに差分方程式を解く。この時、誤差が入り

込むのは避けがたい。どの微分方程式を採用するか、どんな差分スキームを使うか、どの近似で打ち切るか、空間格子寸法をどうするか、によって、誤差が支配される。今の所、誤差を詳細に議論してあるのは、線形長波理論や浅水理論をリープ・フロッグ法で差分化した場合であるから、それに限って紹介する。もちろん、波動方程式であるから CFL 条件を満たさねばならないことは前提であるし、移流項については風上差分が使われていると想定する。

Fig. 4 は線形理論による計算の一例である。本来なら最上部に示された波形が形を変えずに伝播しなくてはならないが、空間格子の寸法に依存して形を変え、波高を減じてしまう。ここでは、初期波形のほぼ3.6波長に相当する3,600 km を伝播した後の波形の変化を示している。こうしたことが起こらないための条件として、「1 波長間に少なくとも20個の格子点」, 出来ることなら30個の格子点が含まれるようにしなくてはならない。この例の場合、中程に突出している短周期成分に対し、こうした条件が満たされなくてはならない。

陸上への遡上先端は移動境界であり、オイラー系の方程式で表現することが難しい。ラグランジュ系の方程式を使ったり、あるいは原点を遡上先端に置く座標交換をするなどの手法もあるが、実用計算では使いにくい。従って、近似的な条件の使用で解決する。この先端部でも数値不安定が問題となる。特に、先行した波が下降してくる所へ次の波が押し上がってくると、その先端部で不安定になりやすい。特別に人工的粘性項をいれて数値振動のエネルギーを殺してしまう方法もあるが、実用としては空間格子寸法を細かく採ることで対処する。常用さ

れる岩崎・真野の近似境界条件に対しては、先端部の局所的な1波長内に少なくとも50点以上の格子点を設けなくてはならない。相田の近似境界条件なら、もう少し楽になる。

2.4 地形図は信頼できるか

津波は海底地形に影響されて屈折し、進行方向を変え、エネルギーの収束・発散を引き起こす。計算に使われる地形が正しくないと、すぐ計算結果の良否として現れる。

わが国では、海図、海の地形図、港湾の深浅図などが地形データとして使われる。

海図は船の航行の便のために作られるものであるから、船の喫水に対して十分な水深がありさえすれば、それ以上に地形精度を向上する努力は払われていない。

港湾の深浅図は、工事のため、あるいは船の航行のために作られ、精度は良いが、対象海域の面積は狭く、補助的な資料にしかならない。

幸い、わが国では、海の地形図、基本図と言った、海底地形を主目的とした地図が多数販売され、ほとんどの沿岸海底が詳細に調べられているから、これを使うのが原則である。

さて海図と海の地形図との間に存在する差を示したのが、Fig. 5 である。

日本海中部地震津波は能代の北で最高15mまで這い上がった。ここは、延長55kmもなだらかな汀線の続く砂浜海岸であり、リアス式海岸のように一見して津波を増幅するような地形ではない。何故15mにも這い上がったのか、当初から疑問とされた。その秘密は前面の海の地形にあった。そこに屈曲した等深線があり、それによって津波は曲げられ、波向線が峰浜村へと集中したのである。

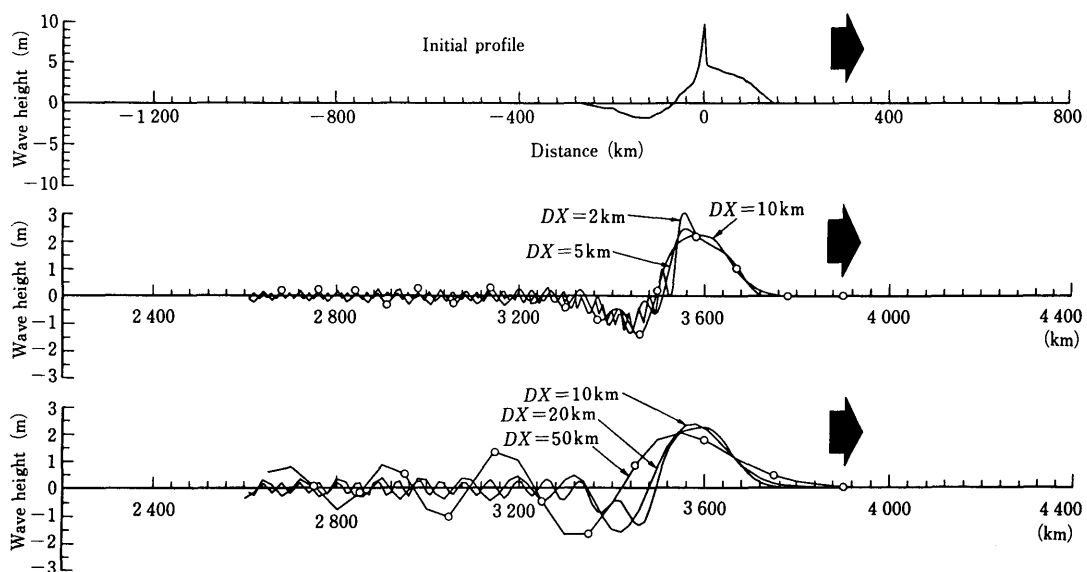
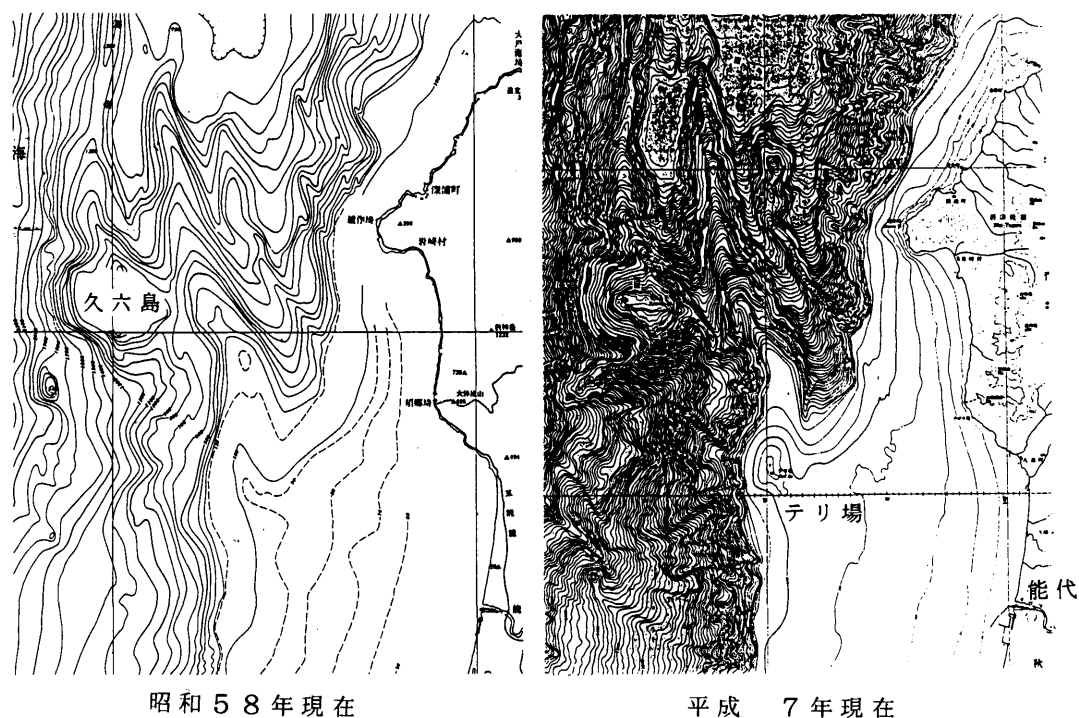


Fig. 4 空間格子寸法による解の違い。本来は上図の波形が保存されて伝播すべきであるが、3,600 km (ほぼ3.6波長に相当する) の距離を伝播した後、計算格子寸法によって形状に違いが生じた。



能代前面海域の海底地形図

Fig. 5 海底地形の精度

普段見ることの出来ない場所の地形が津波集中の原因であった。

1983年当時、峰浜村への津波集中を数値計算で再現しようとした研究者は多かったが、相田を始め、いずれも成功しなかった。初めて成功したのは長谷川ほか(1987)⁹⁾である。使用した地形図がFig. 5左である。「彼らは、従来以上に細かな空間格子を使ったため、この屈曲した等深線による屈折効果を精度良く表現できたのである」と考えられていた。

ところが、平成7年になって、新しく海の地形図としてFig. 5右が発売された。極めて詳細になったこと他に、図中テリ場と称する場所付近の地形が1983年当時の左図とかなり異なった事が注目される。14年前は水深90m前後と思われていたのに、新しい地図では42mになっている。これでは屈折効果はもっと強いであろう。計算はやり直されねばならない事となった。

2.5 津波の測定値は信頼できるのか

1983年日本海中部地震津波が来襲したとき、検潮記録を基に発表される津波高が小さいにもかかわらず、伝えられる被害が大きいことが問題となった。その後、詳細な検討が行われ、周期が5分～20分程度と短い近地津波に対しては、検潮井戸の周波数特性が津波波形の記録には適さないことが明らかになった。Fig. 6(Satake *et al.*, 1988)¹⁰⁾はその例である。顕著な例では、記録波高を2倍

以上拡大しなくてはならなかった。

数値計算の検証として使用する場合、検潮井戸の水理フィルター特性を使って修正した検潮波形が使われることが多いが、いったん消えた短周期波形はこの修正では戻らない。数値計算で得られた波形を水理フィルターで修正し、その後これを検潮記録と比べるのが正しい検証方法である。

また、検潮所は港湾の奥など局所的な地形の影響を強く受けるところに設置されているものが多いから、空間格子の寸法に良く注意を払った計算をしないと、比較の対象になりにくい。

こうした条件に加えて、検潮記録は少ないため、検証材料としては良いものではない。

数多く得られるのは津波痕跡記録である。ただ、痕跡が第何波で生じたのか、それを作った津波の運動はどうであったか、等はほとんどが判らない。例えば、日本海中部地震津波の最高打ち上げ高が第一波で生じたことは、目撃者が口をそろえて言う所である。この第一波はそれほど大きくはなかったとも言われる。第二波は10分後にやってきた。これは海上にあるときに20m以上の波峰高を持ち、第一波とは比べものにならない巨大な波であった。だが、第一波の引きと出会ったため、打ち上げ高としては小さいもので終わった。このような経過は、津波再現計算時に必要な情報であるが、こうしたことが

首 藤 伸 夫

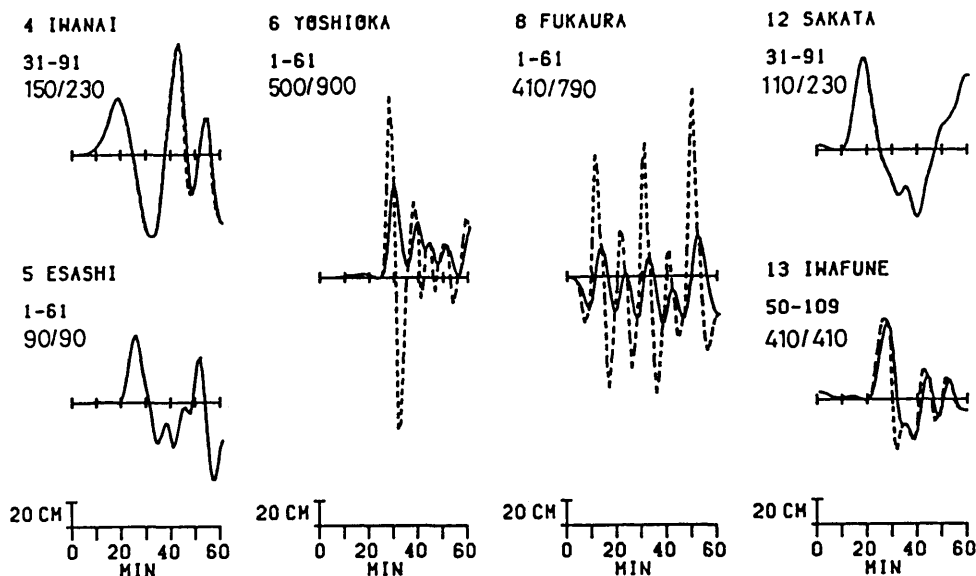


Fig. 6 検潮記録（実線）と水理フィルター特性修正後（点線）

判明している痕跡は極めて数少ない。

また、崖海岸で盛大に打ち上げる大量の飛沫が痕跡を作っていることもある。これを飛沫とは思わず通常の浅水理論で再現しようとする、津波を大きく見積もりすぎる結果になる。どのような運動で生じた痕跡かを判断して、比較検討の対象を選ばなくてはならない。

一般に、災害調査時に行われる痕跡調査では、どうしても大きい値に注目が集まる。わずかな距離離れて小さい値があっても、こちらは見落とされる可能性が高い。これでは津波の全体像は判らない。Fig. 7は、詳細に行われた調査の一例で、50mおきに測定されている。50m離れただけで2mもの差のある場所が2カ所存在する。もし、大きな値だけが重要視されていたとすると、この付近の津波エネルギーは過大評価されたこととなる。通常使用される30m程度の最小空間格子では、このような違

いはとても再現できない。

数値計算結果を検証する場合、一方では津波痕跡の性質、測定密度、測定精度等を考慮し、他方では数値計算の精度を考えながら、両者を比較することが必要なのである。

3. 津波対策の現況

3.1 津波被害の種類と程度

津波がもたらす災害というと、人命、家屋、漁船位が思い浮かべられるが、そのほかにも様々な被害がある。これまでの実績をまとめたのが Table 1 (首藤, 1994)¹¹⁾である。

また、どの程度の被害なのかを、被害の生じた場所での津波高との関連でまとめたのが Table 2^{11), 12)}である。なお、最下段については被災集落全体を対象としている

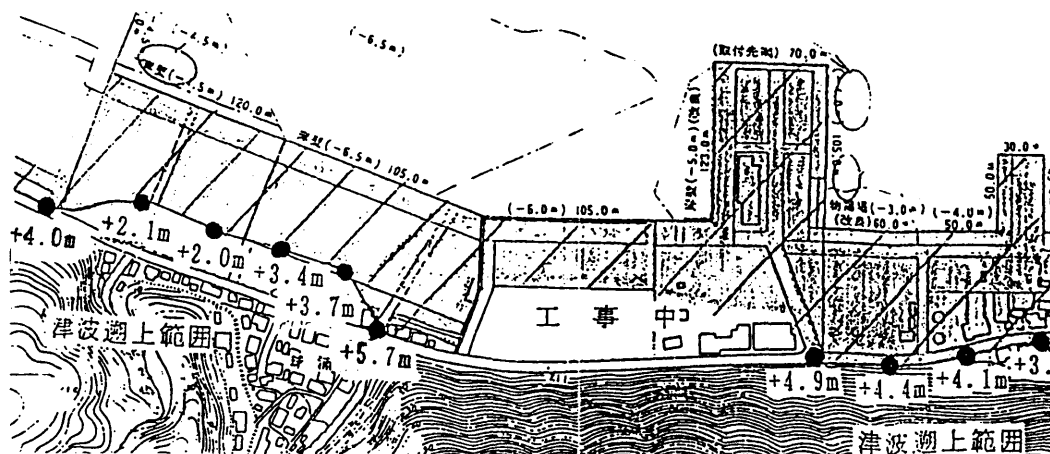


Fig. 7 詳細に測量された津波痕跡（北海道開発庁）。測線間隔50m。

津波研究の現状と津波対策

Table 1 過去の津波災害の例（文献11に一部加筆）

人命被害	形態（溺死、漂流物による打撲・骨折、漂流中の異物呑込みによる病気等） 原因（避難行動無し＝無知識、津波軽視、地震無感知及び警報非伝達等。 避難の遅れ＝水中作業者、体力過信、過多情報への不信感、立ち返り、交通渋滞、避難路の不備。 救命胴衣不着用）
家屋・財産被害	形態（家屋の流出・破壊・浸水、浸水による電気製品などの障害、自動車の流失・浸水による障害） 原因（津波による波力・浮力・流水力、流木・流出船舶・流出家屋・車の衝突力）
防災構造物被害	洗掘による破壊、倒壊、変位、漂流物衝突に起因する大外力による破損、ブロック堤の沈下・散乱、落石防止工の転倒。
交通障害	鉄道（法面洗掘、道床欠壊、軌条移動、鉄橋変位、臨港線埋没） 道路（漂流物衝突による変位や落橋、橋台周辺の洗掘が原因の落橋、法面洗掘、漂流物堆積による交通閉鎖） 港湾（土砂堆積による水深低下、局所洗掘による港湾構造物の破壊、流出物による港口閉塞等の機能障害）
ライフライン被害	水道（漂流物衝突による消火栓・給水栓破壊、河川よりの取水口の破壊） 電力（電柱倒伏・流出による送電停止、発電所浸水による障害や停電） 通信（電柱や架空ケーブルの被害、地下ケーブルの立ち上がり部切断、電話機の冠水被害、海底ケーブルの流失） 下水道（排水溝を通じての浸水）
水産業被害	養殖筏や漁網の流出、水産物流失・死滅、漁船流出・破壊、漁船発火焼失。
商工業被害	浸水による商品価値の喪失。
農業被害	冠水による作物被害、流入土砂による農耕地埋没、土砂または漂流物による用水路埋没。
森林被害	幹折れ・倒伏・土壌洗掘などの物理的被害、浸塩水・埋砂による生理害。
火事	流出家屋台所から出火、漁船機関室からの出火、ガソリン保管庫への漂流物衝突による出火、スイッチボックスへの漂流物衝突による出火、漏電による発火。
石油流失	火事の火元及び延焼の原因、環境汚染。
地形変形	河口砂州切断、浅瀬の変化、砂浜の変形、河川内堆砂。

Table 2 津波の大きさと被害の程度（文献11, 12に一部加筆）

津波強度		0	1	2	3	4	5
津波高(m)		1	2	4	8	16	32
津波形態	緩斜面	岸で盛上がる	沖でも水の壁 第二波砕波	先端に 砕波を伴う ものが増える。		第一波でも 巻き波砕波を 起こす。	
	急斜面	速い潮汐	速い				
音響				前面砕波による連続音 (海鳴り, 暴風雨)			
				浜での巻き波砕波による大音響 (雷鳴。遠方では確認されない)			
				崖に衝突する大音響 (遠雷, 発破。かなり遠くまで聞こえる)			
木造家屋		部分的破壊	全面破壊				
石造家屋		持ちこたえる			(資料無し)	全面破壊	
鉄・コン・ビル		持ちこたえる				(資料無し)	全面破壊
漁船			被害発生	被害率50%		被害率100%	
防潮林被害 防潮林効果		被害軽微 津波軽減	漂流物阻止		部分的被害 漂流物阻止	全面的被害 無効果	
養殖筏		被害発生					
沿岸集落			被害発生	被害率50%		被害率100%	
打上高(m)			2	4	8	16	32

ため、その集落における最高打ち上げ高との関係になっている。被害が生ずるには力学的な過程が存在するが、それを考慮して被害推定を行うことは未だ出来ない。

3.2 津波対策の手法

津波対策が我が国において組織だて行われるようになったのは、1960年のチリ津波以後であるとして良い。チリ津波は太平洋全沿岸で5～6 mの高さであり、構造物で対処しやすい高さであったから、緊急対策として防潮堤が5カ年間で建造された。それが終了して3年目、十勝沖地震が発生し、津波が三陸地方を襲ったが、幸いにしてチリ津波とほとんど同じ高さであったため、陸上への浸水は完全に防ぐことが出来た。しかし、反面、特に若い住民の間に、津波対策は万全であるとの印象を強く与えてしまったことが大きな問題として今日まで続いている。十勝沖地震津波は中規模津波でしかないのである。

その後、岩手県や静岡県などの特別な地域を除き、津波対策は余り進行しなかった。だが、1980年代に入って、過去の大津波や巨大津波に対する備えをどうするかが話題となり、津波常襲地域総合防災対策指針（案）が検討された（建設省河川局，1983）¹³⁾。完成を見たのは1983年3月、日本海中部地震津波発生 of 2カ月前であった。この時は、三陸地方のような特定地域が念頭に置かれていた。

この対策案の特徴は、二つある。

まず第一の特徴は、構造物の限界を公認し、津波がこれを越えることがあるとした点である。洪水による河川堤防破壊が裁判の対象となっていた頃であったから、構造物の上を越える津波があると明記するにはためらいのある時代であった。

計画対象としては過去200年位の最大の津波を採用する。これに構造物だけで対処しようとする、場所によっては30 m以上の堤防が必要となる。経済的な負担も大きすぎ、建設時間もかかり、また日常生活にも不便である。稀にしか働かない構造物の強度・機能を長時間維持していくことも難しい。そのうえ、沿岸住民の中には生活の不便に耐えかね、防潮堤の前面に住居を構える人も出て来て居るのが実状である。

そこで、防潮堤はある程度に押さえ、その他の二つの方法、防災地域計画、防災体制とで対処しようとする。これが特徴の第二点である。

長期的に沿岸集落を津波に強い体質に変えていくのが防災地域計画（現在では、防災街づくりと言う）である。端的に言うと、住居・弱者施設・重要施設の高地移転、汀線際の建物の耐浪化、防浪地区の設定等が主な項目である。

どのように準備しても、我々の予想を越える津波はありうるだろう。備えを上回る津波が来たときには、防災体制で対処しよう。その内容は、予警報とそれに基づく避難、正しい災害文化の継承、また災害発生後の救援体制の準備などである。

Table 3 に、この対策指針（案）の主な項目を示す。

北海道南西沖地震、そして阪神・淡路大震災を経験し、津波対策の見直しがあちこちで始まった。Table 3 の内容も今見直されており、津波防災計画策定指針（案）として近日中には公表される模様である。

3.3 津波対策上の問題点

ここ14、5年の間に、津波工学には、かなりの進歩が見られた。津波による被害の程度が想像できるような資料が揃いつつあり、また一方では数値計算が普遍的になったことが、その理由である。今では数値計算抜きの津波対策立案は考えられないのだが、新たな問題も発生している。

まず問題となるのが、どのような津波を計画対象として選択するかである。今までは、信頼性の高い資料が多く入手できる過去の津波のうち、最悪の津波を対象とすることが多かった。最近では地震地体構造論から定まる最大地震による津波を対象にしようとする方向に動きつつある。地震空白域がある場合には、ここで発生するであろう津波への対応が求められることもある。

このような地震から津波を求めようすると、地盤変位が必ずしも地震と対応するとは限らないことがほとんど理解されていない現状が、問題を複雑にする。2.1で示したとおり、出発点で2倍以上も差の生ずることがあるのだから、これが原因で生ずる誤りをどう防ぐかが、大問題となる。これに加え、地震が小さくとも津波の大きい「津波地震」が日本近海では10～15%あるという事実はどう対処するかが、まったく手付かずに残されている。

次の問題点は、数値計算結果が極めて正確に見えるために、数字に頼りすぎる危険性である。河川での計画では、理屈を追いかけて堤防の高さを出し、その後何の根拠もなしに余裕高を加える。大河川ならこの余裕高が2 mもの高さになる。その河川がもし破堤したときの影響の大きさもさることながら、我々が自然を良く知っては居ないことの謙虚さの現れなのである。津波対策では、精密に見える数値計算が先行し、また人間の構造物が自然外力に木っ端みじんにされた経験が少ないために、この謙虚さが備わっていない。構造物が無力であることを思い知らされていないのは、構造物が十分な機能・強度を維持しているからではなく、津波の発生が間遠であるからに過ぎないのだが。

構造物だけが津波防災ではないと述べたが、防災施設

Table 3 津波常襲地域総合防災対策指針(案)の概略(1983年3月)

計画対象津波

精度の良い記録が多数得られる、過去100—200年間の最大の津波。

計画を超える津波もあり得る。

防災施設の整備水準は、必ずしも計画対象津波に対応する水準をとるとは限らない。

防護目的と対応手段

人命、資産、地域総体——防災施設、防災地域計画、防災体制。

防 災 施 設

- ①防潮堤
- ②津波防波堤
- ③津波水門
- ④河川堤防（高潮堤）
- ⑤その他 a) 防潮林、b) 防浪ビル。

防災地域計画

- ①高地移転
- ②土地利用上の対策
 - a) 津波防災上の土地利用（津波被害を軽減出来る土地利用形態への誘導）、b) 防浪地区の設定（鉄筋コンクリート造の推奨）、c) 緩衝地区の設定、d) 防潮林の保全（漂流物阻止）、e) 旧堤の保全。
- ③公共施設対策（庁舎・学校・病院・公民館・公園等の公共施設）
 - a) 地域土地利用の誘導、b) 避難・救援の拠点、の観点からの配置や構造。
- ④交通施設対策（道路、鉄道）
 - a) 地域土地利用の誘導、b) 避難路、c) 救援路、の観点からの配置や構造、d) 二線堤としての役割。
- ⑤その他の対策
 - a) 建築物の耐浪化、b) 危険物対策（二次災害防止）、c) 堤外地の水産関連施設対策、d) 通信施設や供給施設（電力施設、水道施設等）の津波来襲時における機能確保。

防 災 体 制

- ①防災組織の整備
 - a) 消防団、b) 自主防災組織の育成。
- ②予報
 - a) 予報の伝達、b) 津波の観測。
- ③避難
 - a) 住民避難（体制の確立）、b) 避難場所・避難道路の整備、c) 弱者対策、d) 外来者対策、e) 交通対策（自動車による避難の原則的禁止）。
- ④水門・門扉の開閉
- ⑤漁業の防災
 - a) 漁船の処置（人命に危険を与えない範囲で実施）。
 - b) 増養殖施設（漁業共済制度の充実、筏等の二次災害の防止）、c) 漁具類（漂流物にしない管理）。
- ⑥防災教育・広報
 - a) 過去の津波災害記録の発掘及び表示 b) 防災教育（家庭・学校・地域教育）、c) 防災広報。
- ⑦津波防災訓練
- ⑧応急体制
 - a) 応急体制（被災直後に救援災害対策本部のなすべき事項）、b) 一般住民の協力体制。

は外力がその限界以内に止まるならば、極めて有効な対策である。だが、それが働くのは何十年に一度である。海辺の、軟弱地盤に建てられた構造物が、長年にわたり強度・機能を維持できるであろうか。もし劣化しているとしたら、それをどう発見すればよいのかが判っていない。これは構造物の数が増え、しかも建造より年数が経って来た現在、真剣に取り組むべき問題である。

4. 良質な資料と精度の良い予報のために、まず観測を

沿岸地域は最近では急速に変貌している。過去に例を見ない形態の被害が予想も出来ない規模で発生する危険が増加しつつある。こうしたことを予測するための学問・技術は、皆無に近い。津波の本当の姿が判らず、従って波力の推定も出来ず、ましてもっと破壊力を発揮する漂流物の衝突力も判らない。

沿岸集落を日常生活にも便利で、津波にも強い体質にするには、防浪地区の設定と耐浪建築が有効と考えられているが、どのくらいの強度があれば津波に堪えるかの判定が出来ないのである。

防災体制の中で最も期待されるのが津波予報である。ただ、現行の津波予報には欠陥がある。最大級の「オオツナミ」の意味するところが「高い所で約3メートル以上に達する見込み」というのでは役に立たない。高さ5、6mの海岸堤防が備わった現状では、この堤防を越えるのか越えないのかが予報されないと意味がない。津波予報の改善作業は目下気象庁で進行中であり、まもなく実用になると期待されている。

しかし、10～15%はあると考えられている津波地震は、改善中の気象庁の方法でも対処できない。

こうした状況の抜本的な改善策で、しかも技術的にも確立しており、今直ぐ採用できる確実な方法は、沖合いでの津波計の展開である。深海津波計の記録を即時的に利用して津波予報の修正を行えば良い。予報に役立つことに加え、発生して間もない津波を掴まえるから、津波初期波形の確定と言った学問上の疑問の解明にも重要な情報を与えることとなる。わが国では御前崎・房総の2カ所に気象庁のものがあり、またごく最近釜石沖に研究用として東大・東北大が設置した。科学技術庁が高知県室戸岬沖に設置した海底地震総合観測システム、平塚沖に設置した海底地震観測施設でも津波を掴まえることが出来る。高価なものであるから、縄張りを越えた連携により、津波研究・津波予報に使われる運用を強く要望しておきたい。それにしても、深海津波計は、まだ足りない。米国のNOAAもアラスカ沖・米国西岸沖に展開しており、日本・米国のどちらが深海での巨大津波を先につかまえるかが争われる時代になった。ごく最近、NOAA

は深海の津波計で捉えた津波波形に基づく実時間予報を目指すブイを展開中である。その鍵は、2,500m以上深い海底で測られた水圧の変化を海上へ上げる為の音響モデルを開発したことである (Milburn *et al.*, 1996)¹⁴⁾。こうして得られた水位を沿岸へは衛星を通じて送り、実時間での津波予報に使用すると言う。NOAA のホームページ (<http://pmel.noaa.gov/tsunami-hazard/>) で、一般にも公開している。

沿岸での津波計測で、潮位計が時として大きな誤解の基となることは先述した。この危険のない沿岸近くでの測定器としては、超音波波高・流速計がある。これの運用が改善されつつあり、近い将来津波の水位・流速を必ず計測できるようになる。流速資料は皆無に近かったから、重要な進歩であった。

また、既設の検潮所が水没する程大きな津波でも、これを記録できる巨大津波観測計も整備されつつある¹⁵⁾。

ともあれ、科学にとって、および防災技術にとって、まず良質な計測が必要である。津波の化石と言うべき古文書や痕跡の研究から浮上し、ダイナミックスとしての津波を研究するには、良質な計測データ無くしては発展は望めないのである。

参 考 文 献

- 田中和夫, 佐藤魂夫, 小菅正裕, 佐藤裕 (1983): 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, 39-45.
- 相田勇 (1984): 1983年日本海中部地震津波の波源数値モデル, 地震研究所集報, 59, 93-104.
- Shuto, N., K. Chida and F. Imamura (1995): Generation mechanism of the first wave of the 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake tsunami, *Advances in Natural and Technological Hazard Research*, 1, Kluwer Academic Publishers, 37-53.
- 菊池正幸 (1993) 遠地実体波による北海道南西沖地震の破壊過程, 日本地震学会講演予講集, 2, 28.
- Takahashi, To., Ta. Takahashi, N. Shuto, F. Imamura and M. Ortiz (1995): Source Models for the 1993 Hokkaido Nantai-Oki Earthquake Tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, 144, 747-767.
- 後藤章夫, 高橋浩晃, 宇津木充, 小野忍, 西田泰典, 大島弘光, 笠原稔, 竹中博士, 斉田智治 (1994): 北海道南西沖地震に伴う津波, 一小樽から礼文島まで一, 海洋号外, 7, 153-158.
- 宇多高明, 小俣篤, 横山揚久 (1988): 斜面上を進行する非線形長波の2次元変形に関する実験報告書, 土木研究所資料, 2627, 113.
- Shuto, N. (1991): Numerical Simulation of Tsunamis-Its Present and Near Future, *Tsunami Hazard* edited by E. N. Bernard, Kluwer Academic Publishers, 171-191.
- 長谷川賢一, 鈴木孝夫, 稲垣和男, 首藤伸夫 (1987): 津波の数値実験における格子間隔と時間積分間隔に関する研究, 土木学会論文集, 381/II-6, 329-332.
- Satake, K., M. Okada and Ku. Abe (1988): Tide gauge response to tsunamis, Measurements at 40 tide gauge stations in Japan, *J. Marine Research*, 46, 557-571.
- 首藤伸夫 (1994): 津波被害と津波防災, 月刊海洋, 号外, 6, 51-55.
- Shuto, N. (1993): Tsunami intensity and disasters, *Advances in Natural and Technological Hazard Research*, 1, Kluwer Academic Publishers, 197-216.
- 建設省河川局 (1983): 津波常襲地域総合防災対策調査報告書.
- Milburn, H. B., A. I. Nakamura and F. I. Gonzalez (1996): Real-time tsunami reporting from the deep ocean, *Proc. Ocean '96, MTS/IEEE Conf.*, (印刷中)
- 気象庁 (1997): 今日の気象業務, 226.

質 疑 応 答

問: (1) 津波の5分~10分という周期はどのようにして決まっているのか。

(2) 漁港が干上がる写真を見せて頂いたが、津波の峰に対して谷として元の水面から下がる分は同程度に大きいということでしょうか。

(東京大学海洋研究所, 杉本 隆成)

答: (1) 津波初期波形には様々な周波数成分のものが含まれていますが、最も卓越する成分の周期は津波波源での一波長の長さから決まります。

(2) その通りです。

問: 津波遡上計算に当たり、海岸線、海底地形の複雑さに応じて細かい差分格子を採用していると思いますが、格子幅の選択をどのようにお考えでしょうか。

(日本大学生産工学部, 和田 明)

答: 地形表現の程度により屈折現象に影響が出ますから、数値計算上重要な問題です。しかし、このための基準は今の所一つしかありません。一様傾斜面に任意の角度で入射する場合、この斜面をいくつに分割すると誤差がどのくらいになるかが求められていますが、これより複雑な場合に関しては、現在研究中です。陸棚や島回りでの津波の捕捉などは、すべて地形をどの程度精度長く計算機内に復元してやるかで決まりますから、もっと研究されて良い課題だと思います。

問: 防波堤, 防潮堤, 護岸等の設計の際には設計津波を考える必要があると思うが、頻度が非常に少ない津波のような現象に対しては、どのように考えたらよいか。

(横浜国大, 多部田 茂)

答: 津波対策の近い将来の考え方として、防災計画の対象とする津波は次の2つの内、大きなものを採用することになりましょう。一つは地震地体構造論から求められる最大地震で引き起こされる津波、もう一つは過去の津波で信頼のおける資料が数多く得られるものです。しかし、この計画外力が、防災施設の設計外力に

選ばれるとは限りません。場所場所で施設、街づくり、防災体制を組み合わせますから、施設の設計に使われる津波は計画外力より小さい場合もあり得ます。

問：(1) 陸岸近くでの計算格子間隔を細かくとって津波伝播途上でのソリトン分裂などの非線形性を再現することで、津波の到達時刻をもっと精度良く予報することが期待できるのではないのでしょうか。

(2) 津波予報は現在のところ鉛直方向に積分した2次元モデルに基づいているようですが、陸岸近くでは(水平計算格子のみならず)、鉛直計算格子も細かくとって3次元高精度レベルモデルで行う必要があるのではないのでしょうか。

(3) 特に、陸岸近くでの摩擦の見積もりは計算結果にどの程度の影響を及ぼすのでしょうか。

(東京大学海洋研究所、日比谷紀之)

答：(1) 津波の伝播速度には波高有限性や分散効果などももちろん効きますが、その程度は小さいものと思われます。津波先端を想定して頂ければ判りますが、ここでは波高零、分散効果もほとんど効かず、線形長波速度での進行で、水深のみが効くこととなります。今までの例で、津波到達時間に差が生じたのは、津波発生機構に不明の問題が残されているからだと考えています。例えば、地震による地滑りの発生、地盤変位が通常計算されるものと異なっている可能性等の方が重要でしょう。また、海図の精度の悪い場所では、これも影響していると思います。

(2) たしかに3次元高精度モデルの必要な場所があります。例えば、南西沖津波が30mを越えて這いあがった地点では、この必要性を強く感じております。航空写真から5mおきに地盤高を読みとった精密な地図を作成し、地形表現精度をあげて計算しましたが、普通使われる浅水理論では説明できませんでした。鉛直加速度を無視しない計算が必要です。ただし、こうした計算が要求されるのは特殊な場合に限られると思われます。

(3) もし、海底摩擦項を特殊な目的に採用する場合には、これが大きく効くようにすることは出来ます。例えば、家屋などを抵抗に換算して表現しようとするときは、摩擦係数を物理的に予想される値の10倍、20倍

にします。こうして、最終打ち上げ高を制御する事があります。しかし、例えば砂浜海岸でマニングの粗度係数0.025程度のものを、物理的にあり得る大きな値0.040程度に引き上げても、最終結果には大きな影響は与えません。

問：わが国の津波・高潮などは完全に防げないと思われる。別の対策も必要と考える。例、津波などから住民を守るためには過去100年～200年に起こった津波などを参考に(それが5mとすると)、5m以上の高い所に住む住民移住などの行政判断が望まれる。実際に、日本では行政と住民の責任をどのように考え、実行に移しているのですか。その例があれば教えて欲しい。

(資源環境技術総合研究所、石川 公敏)

答：高地移転を実現した場所は、いくつもあります。また、せっかく移転したにもかかわらず、なし崩しに旧に復した例もいくつもあります。抜本的な対策とするには、少なくとも高度20m以上の地点へ移動しなくてはなりません。これが、過去における高地移転問題を難しくしていました。大津波を過去に経験したところでは、昔から高地移転が行われております。

三陸地方の高地移転の成功例と失敗例は、山口弥一郎(山口弥一郎選集、第六巻、世界文庫)が詳しく調べています。山が迫った三陸沿岸地方では半農半漁村で、移転に適した高地は農業中心の人の生活の基盤でした。漁業を営む人は、浜の近くに住みたがります。現在では自動車が利用できますから、居住地と作業場との距離もさほど問題なく処理できるようですが、しかし、漁師は海の見える所でないと一日の作業の段取りがつかないと言って、海から離れることを嫌がる傾向が今でも強いのです。

もちろん、最近でも高地移転の成功例はあります。紀伊田辺市の内之浦は南海地震津波で被害を受けたところです。現在、内之浦を公園として整備する干潟周辺整備事業が進行中です。ここの低地に居住する人が、高地に造成された場所に移る場合、造成地の土地単価と同じ土地単価でその人の土地を市が購入することで、移転に便宜を図っています。普通、高地移転は被災直後に行われるのですが、ここは被災から50年も経過して実現している珍しい例です。