

# 津波災害—予測と対策—

今 村 文 彦\*

## Extensive Damage Caused by Tsunami: Prediction and Countermeasure

Fumihiko IMAMURA \*

### Abstract

Tsunami has caused heavy damage to the coastal areas in Japan where the activitive countermeasure have been carried out to reduce the possibility of disaster. Tsunami warnings that provide with the arrival time and tsunami heights before the attack was started in 1952 and recently improved incorporating a database using computer simulation, in which the initial of a tsunami is estimated from only just seismic information. Combined numerical simulation together with observation in real time is proposed to improve estimation of the initial tsunami conditions. Simulation used to evaluate the damage caused by tsunami such as casualties, destroyed houses, and so on has been developed with the GIS data and a model of human behavior for evacuation. Study on historical tsunami using the sedimentrological approach is introduced to understand the detailed behavior of recent and historical events on land.

**Key words** : tsunami warning, numerical simulation, tsunami disaster, sedimentorology, historical tsunamis

キーワード：津波警報, 数値シミュレーション, 津波災害, 堆積学, 歴史津波

### I. はじめに

気象を除く様々な地球物理現象を原因として発生する津波の周期は数分から1時間程度であり, 津波は代表的な長周期波の1つである。周期が長いために, 津波の先端が陸上に至ってから次々と後方から打ち寄せ, 浸水域が大きくなる。そのために, 陸上で家屋や住民などに大きな被害を及ぼす。また, 浸水・遡上後に水位の低下に伴う戻り流れも強く, これによる被害も大きい。

また, 地震被害と比較しても津波の被害規模や範囲は大きい。かなり大きな地震でも強震動の範

囲はある程度限定されて, 太平洋の対岸まで影響を及ぼすことはない。しかし, 津波は海水がある限り伝播し, 数万キロを伝わり被害を生じる場合もある。津波の発生頻度は地震と比べて低い, 一旦発生するとその影響は大きく, 多大な被害を及ぼしている。実際, 過去の甚大な自然災害を見ても, 上位に必ず津波による被害が挙げられている(渡辺, 1998)。

このような状況にも関わらず, 津波に対する防災対策はなかなか進まない。原因は, 発生頻度が低い上に影響範囲が広いことがあり, ハード・ソフトの両面で解決すべき困難な問題が多いのであ

\* 東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター

\* Disaster Control Research Center, Graduate School of Engineering, Tohoku University

る。こうした中で、本論では津波災害低減を目指した活動について報告する。特に、数値シミュレーションを利用した量的予報、被害予測の可能性と方向性、津波堆積物による歴史津波の検証などの事例を詳しく紹介したい。

## II. 津波現象の予測—人命を守るために—

### 1) 津波警報の始まり

人災軽減のためには、「来襲前に津波が到達しない高台に逃げる」ことが基本であり、迅速で精度のより高い予報が重要であることは明らかであろう。我が国の津波予報組織の歴史は古く、昭和27年(1952)4月から正式に開始された。同年3月の十勝沖地震津波の際にはまだ準備期間であったが、組織が稼働して予報に成功している(高橋ほか, 1988)。現在、我が国の海岸は66区に分割され、6カ所の津波予報中枢で分担して予報が発表されている。

津波の発生地点が日本の海岸より600 km以内の場合に、近地津波として予報が行われる。予報の内容は津波予報文で示され、津波注意報と津波警報に分かれる。平成11年4月からは8段階の津波高さも数値として発表されるようになった。気象庁からの報文は沿岸地域まで伝達され、各地方自治体が住民に必要なに応じて避難勧告などを発令する。この発令は状況の程度により、避難準備、避難勧告、避難指示(命令)に分かれる。通常、気象庁から津波警報が出されると避難指示が発令される。

警報にとっては、その所要時間と各地での予報精度が最も重要な要素である。津波警報発表に要する時間は、昭和27年(1952)から昭和45年(1970)までは平均22分±10.7程度であったが、昭和46年(1971)から昭和58年(1983)までは16±6.7分程度となり、昭和58年(1983)の日本海中部地震津波の際には14分程度で津波警報を発表できた。しかし、その津波が7分で来襲した場所もあり、予報発表時間の一層の短縮が要求されていた。さらに、平成5年(1993)の北海道南西沖地震津波では5分で発表されたが、ほぼ同時刻には奥尻島南部には津波の第一波が来襲し

ていた。このような経験を踏まえ、現在までに気象庁は地震後3分程度で発表できる体制となっている。地震波の読み取りに1,2分は必要であることを考えると、この3分は限界値に近い値であると思われる。

過去の予報回数を見ると、昭和27年(1952)から昭和61年(1986)までは年平均1.5回程度であり、注意報は年平均2.2回である。平成4年(1992)以降の地震活動は活発であり、気象庁が発表した回数およびその時間は急激に増加し、年に5回以上の警報が発表されていた。特に、平成6年(1994)前後では3~4倍に増えていることがわかる。これは、津波を伴う地震の活動が活発であること、発令基準が従来より下げられていることも影響していた。従って、住民の中に、警報発令を受けても避難行動をとる割合が低下している事実もある。また一旦、注意報や警報が発表されると沿岸での漁業活動は制限されるため、その影響は大きく、正確な津波観測に基づく迅速な警報の発令とその解除が要望されている(今村, 1998)。

### 2) 数値予報の開発と精度向上

津波の挙動は沿岸での地形の影響をうけて複雑に変化する。この挙動を知り津波高さを推定するには、海底地形を十分取り入れて津波の伝播を予測する必要がある。津波来襲より前に伝播時間や波高を予測できれば、その効果は大きい。1960年代に、発生機構として矩形断面を仮定した断層モデルが提案され、津波の発生条件(初期波源)を量的に定式化することが可能となった。このモデルは幾何学特徴を表わす静的パラメータ(図1を参照)と運動学的な特徴を表わす動パラメータから構成されており、特に前者のパラメータにより断層運動に起因した最終海底変動量を算出することができる。求められた変動量の鉛直すべり成分を初期値として伝播モデルに取り入れられ、津波の数値計算は行われる。特に、海底や沿岸での地形は、入力データとして数値シミュレーションに取り入れられ、複雑な津波挙動の再現や予測の計算が実施される。

首藤ほか(1988)は、昭和58年(1988)に三

陸沿岸での海底地形データを作成し、初めて実用的な津波シミュレーション方法を提案した。過去の比較的震源過程がわかっている場合には、最高水位分布を誤差 20% 以内の精度で再現できることを示している。平成 11 年 (1999) 4 月に、気象庁は数値シミュレーションを用いた数値データ

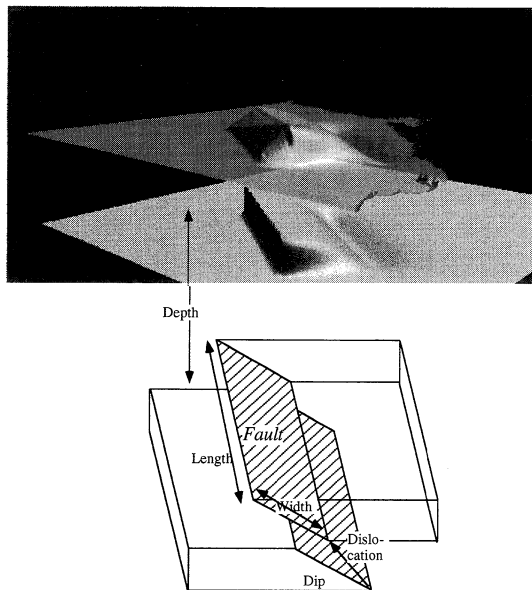


図 1 断層モデルと津波の発生過程。

Fig. 1 Fault model and generation of a tsunami caused by a sea bottom deformation due to faults.

ベースを作成し、これを利用した量的な数値予報体制に移行している (図 2)。

しかし、地震・津波観測網が発展したり災害発生直後に詳細な津波調査が行われるようになると、次第に地震波解析による断層モデルで推定される津波の波源と津波観測 (図 3 参照) または調査から推定される結果との間に、皮肉にも差が生じていることが指摘されるようになっていく (今村, 1998)。特に、断層のすべり量やその不均一性において違いが報告されている。さらに最近では、津波数値計算では今まで無視されてきた地震時の断層の破壊過程の重要性も指摘されている (大町ほか, 1999)。リアルタイムで波源域を正確に推定することも、実は難しい作業である。

その中で、数値シミュレーションと観測網とを融合した方法が検討されている (石田ほか, 1998)。断層運動の未知な部分があったとしても、さらに地震以外の原因で発生したとしても、沖合で実際に津波を直接にキャッチできれば、確実な津波シミュレーションの入力情報として活用できるはずである。例えば、図 4 のように異なる場所での津波計で到達時間がわかると、逆伝播計算手法を用いて、どこから津波が来襲してきたのかという波源を推定することができる。この波源域は断層の長さや幅に関係しており、リアルタイムの地震解析で推定し難いこれらのパラメータについての正確な情報を提供すると期待される。

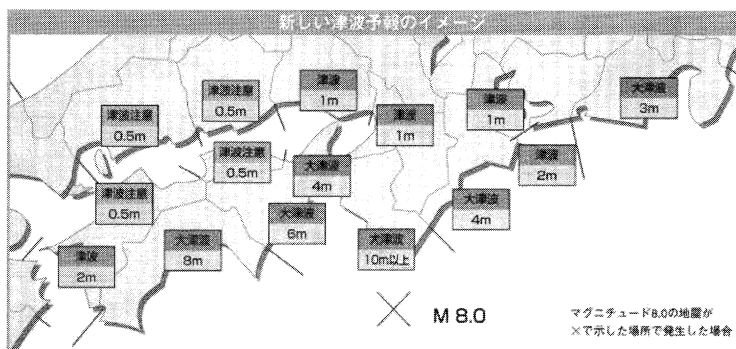


図 2 気象庁による量的津波予報の例 (津波の波高が数値で示されている)。

Fig. 2 Example of a new tsunami warnings incorporating quantitative information on tsunami heights.

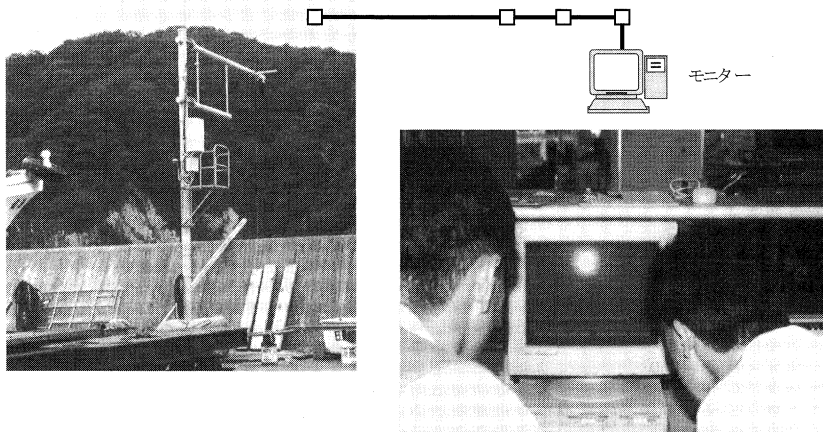


図 3 沿岸自治体で設置している津波計(高精度かつリアルタイムで観測が可能である)。

Fig. 3 Tsunami meters installed by local autonomies for observation of tsunamis with high accuracy and real time.

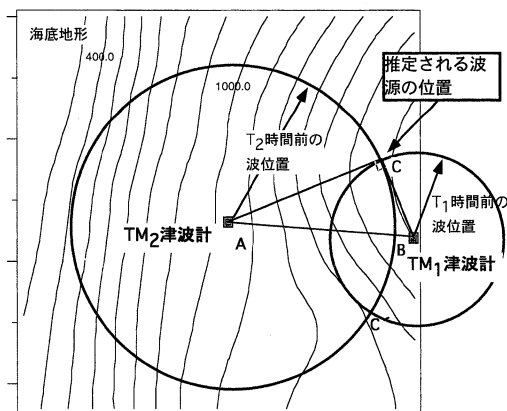


図 4 逆伝播方法による波源域の推定。

Fig. 4 Inversion method using wave rays to estimate a tsunami source.

### 3) 遠地津波数値モデルの開発

我が国の沿岸から 600 km (伝播時間にして 1 時間程度) より離れた場所で発生した津波は、遠地津波と呼ばれている。近地津波の例と比べて到達時間に余裕があるために、数値予報は比較的实施し易いと言われるが、逆に難しい面もある。1 つは、長い距離を伝播する津波には通常無視できた

波数分散性も、その影響を省略することができないことである。また、対象領域が広いために、数値計算を実施する時に膨大なメモリーや計算時間が必要となっていることである。

太平洋を伝播するような遠地津波に対しては、波数分散性を取り入れた高精度な数値計算が必要となったが、計算精度や計算時間・容量の点で問題があった。これに対し、数値計算する際に離散化に伴って発生する数値分散性などの数値誤差を逆利用して物理的な分散性 (本来考慮すべき効果) に等しいように取り入れ (水深に対応させて格子間隔を選ぶ)、計算時間や計算容量を減少させる方法が提案され、チリ津波や 1964 年アラスカ津波を再現することに成功した (今村ほか, 1990)。口絵 3 には、本手法を用いコンピューターグラフィックスにより再現された 1996 年イリアンジャヤ地震津波の伝播の様子を示す。

このような方法で再現された津波の精度は、平均的には精度の高い結果が得られた。特に、波源からの直接波の再現性は大変に高い。一方、大陸棚や海嶺などで反射と屈折を繰り返しながら伝播するような境界波に対する精度は、大きく低下する。今後、大陸棚の地形などの再現性や沿岸での



写真 1 家屋被害の例 (1996 Irian Jaya 地震津波の Korim の小学校).

Photo 1 Example of damage to house caused by tsunami at Korim, Irian Jaya, Indonesia in 1996.



図 5 沿岸域 (陸域と海域) での津波による被害.

Fig. 5 An extensive damage caused by a tsunami in the coastal area.

境界条件 (現在は完全反射を仮定) などの問題を解決しなければならない (Koshimura *et al.*, 1999)。

### III. 災害の予測—様々な災害を評価する—

#### 1) 被害推定の対象

津波は浅海域に近づくにつれて波高や流速を増加させ、我々に大きな打撃を与える (写真 1)。津波による被害は陸域および浅海域での広い範囲に及ぶ。津波による被害の一覧を図 5 に示す。陸上での被害は、人的被害を始めとして、家屋被害、施設被害 (防潮堤、水門)、火災延焼被害、経済被害 (サービス停止)、ライフライン被害 (上下水道、電力、ガス、通信)、交通被害 (道路、鉄道)、農業被害 (水田への塩水浸入) などがある。一方、海域での被災例としては、施設被害 (防波堤など沿岸施設)、船舶被害、水産被害、地盤被害 (土砂移動による洗掘)、油・材木流出 (火災・延焼の原因、沿岸環境汚染) が挙げられる。これらの津波災害の抑止を考えるためには、発生原因、影響、被害程度を明らかにし、予測できるモデル手法の開発が不可欠である。ただし、このような被害を予測するためには、詳しい津波の挙動を知るだけではなく沿岸の人的・産業活動や土地利用を把握しておく必要がある。

#### 2) 人的被害

人的被害は遡上高さに関係し、この推定には河田 (1997) による簡易法が提案されてる。ここでは対象領域の平均遡上高さを与えて、過去の統計的關係より死亡率を推定するものである。これは簡便であるが、その推定死亡率のばらつきは大きく、値が 2 桁も異なる場合もある。これは、津波の来襲形態、居住地区や避難行動により、被災率が大きく変化するためである。そこで第二の方法として、数値計算と GIS を利用して推定精度を高めるという手法がある (小谷ほか, 1998)。詳細な浸水計算を実施して、ある程度以上の浸水深さがあった場合に生命の危険があるとしてその浸水域での人口を求め、これを最大の人的被害と考えるものである。人口分布に関する資料・データが現在入手できない場合には、GIS データ (占有面積率などの家屋の情報) を代用して、この地域での家屋数から人口を算出できる。ただし、避難行動に関しては考慮されていない。

### 3) 家屋被害

過去の研究(羽鳥, 1984)により, 浸水高さや流体力と破壊率との関係が求められているが, 現在の家屋の形態が当時と大きく異なっていること, また, 数値計算を利用できれば局所的な水理量が詳細に求められることから, 家屋被害に関しても人的被害と同様に1メッシュあたりの被害家屋数を概算する方法が提案されている(小谷ほか, 1998)。3種類の家屋に対する破壊基準に関しては, 松富・首藤(1994)の結果を下に, 流速の大きさによって表1のように決めた。これから家屋被害件数, 被害率を求めることができる。

### 4) 土砂移動と流れのシミュレーション

津波による被害については, 先ほど述べたように最大波高・遡上高さに関連した人的・家屋被害を中心に研究が行われている。しかし最近, 津波による思わぬ災害として流れや土砂移動による事例も着目されている。実際に, 強い流れによる船舶や養殖筏の被害, 土砂移動による構造物基礎の洗掘およびそれによる崩壊などが報告されている(首藤, 1998)。また, 最近の津波現地被害調査などでは, 津波の来襲後に数十cm程度の堆積層が確認され, これから津波の陸上での挙動特性などが推定されている(今村ほか, 1997)。なお特異事例として, 安政東海地震津波の際に伊豆半島の先端に位置する入間地区で, 大規模な海砂の堆積が起こったことが報告されている(浅井ほか, 1998)。現在の集落が位置している場所(写真2参照)のほとんどが津波により堆積された砂山に位置しており, その堆積の体積は, 70万 $\text{m}^3$ 以上と推定されている。

津波の流れや砂移動に関する研究には難しい点が多くある。流れはベクトル成分を持つために局所的な地形によりその方向を大きく変え, 水位(スカラー量)よりも, 計算格子間隔の違いによる離散化誤差は大きい。しかも, 実際に津波の流れを計測・観測した例は少なく数値計算の精度や再現性の検討が遅れている。しかしながら, 被害を引き起こす流体力・破壊力は水位よりも流速に関係し, その精度は被害推定の結果に大きく作用するため, 今後の検討が必要である(今村, 1998)。

表 1 家屋の破壊基準 (限界)  
Table 1 Criterion of house damage due to a tsunami.

家屋の種類	津波流速 (m/s)
鉄筋コンクリート造	10.2 以上
コンクリート・ブロック造	10.2
木造	4.2



写真 2 津波による大規模砂堆積 (安政東海地震津波による伊豆半島入間での例)。

Photo 2 Large-scale tsunami deposit caused by the 1854 Ansei Tokai earthquake tsunami at Iruma, Izu, Japan.

### 5) 避難行動のシミュレーション

I章で津波予報について述べたが, 人命を最終的に救うには迅速かつ確かな避難行動が重要な役割を担う。適切な避難行動を行うためには, 避難に関する正しい情報提供, 住民への早期避難等の啓蒙, さらに適切な避難所・経路の確保が重要である。

このような避難対策の中でも最も大切となるのは, 住民の避難行動特性に応じた避難誘導計画の策定であるが, 災害(特に津波)時における住民の避難行動は複雑かつ広域に及ぶため, その状況を実験やアンケート結果などの手法によってのみ把握するのは困難である。そこで津波時の住民の避難行動を再現しうる数値シミュレーション法を開発しようという試みがある(今村ほか, 2001)。津波時の避難シミュレーションでは比較的広域な範囲を対象とし(図6), 地下街の群集行動というより個人単位での住民避難行動を表現している。さらに, 避難経路がノード・リンクでモデル化さ

れ、避難群集の表現としてはトランザクション型、二方向流型の群集の流動方向、さらに内生型の経路選択方法がとられている。住民の避難開始やその後の行動は、経験の有無、情報提供、津波の認識の程度、日時、場所などの情報を取り入れ変化させるようにしている。まだ、限られた地域での適用であるが、今後注目されていくと思われる。

#### IV. 歴史津波を知る重要性 —堆積学的アプローチ—

##### 1) 堆積学的津波調査の始まり

大きな被害を及ぼす津波の発生頻度は極めて低

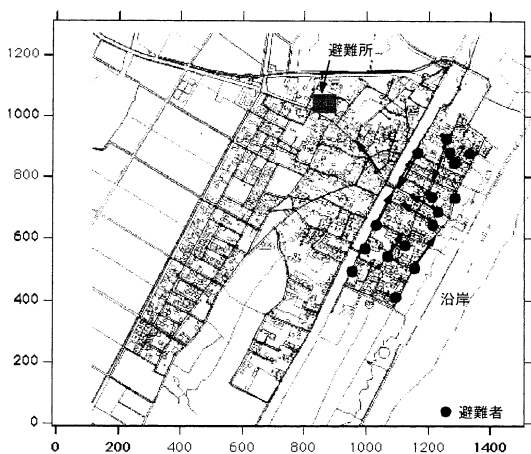


図 6 津波避難行動シミュレーションの例。

Fig. 6 Numerical simulation of evacuation and human behavior in the case of a tsunami attack.

く、一度発生するとその影響は極めて大きい。この特徴は、津波の研究および津波対策の難しさにつながっている。滅多に発生しないから実像を明らかにするための資料が乏しい。また、口承として伝えられているもののその存在が明らかでない場合も多く、さらに、有史以前の津波を探ることは極めて難しいのが現状である。現在考えられている唯一の物証は、大地に残された津波の痕跡、即ち津波で運び込まれた土砂である。最近、地質学や堆積学の立場からの発掘が世界的に進歩し、各地で過去に來襲した津波が発見されるようになってきた。

その中で、最近の津波堆積物から数多くの標本が得られ（今村ほか，1997），その分析から津波による流水運動を推定しようという試みがある。沿岸に到達した津波は掃流力を増し、浮遊砂と掃流砂という形式で陸上に移動させる（図7参照）。掃流力が大きいほど浮遊砂の割合は大きくなる。さらに、遡上した津波は陸上での抵抗や浸透により徐々に掃流力を低下させ、砂を沈降または停止させていく。津波は長周期波であり、シート状に広い範囲で比較的均一に砂を堆積させるので、高波や高潮による砂移動状況と異なる。津波による砂堆積はくさび形状になるのである。さらに、砂の粒径を詳細に調べると、陸上に行くにつれて径は小さくなり分級していく。このような状況が陸上に残された堆積層に蓄積される。これを解明しようというのである。ただし、津波により常に堆積するとは限らず、戻り流れが大きい場合には一

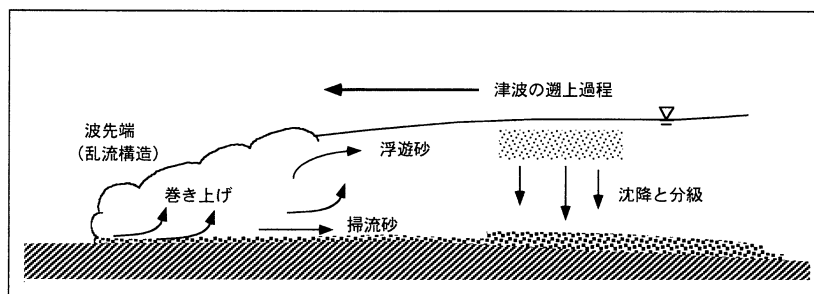


図 7 津波先端部での砂移動機構。

Fig. 7 Sand transported by a tsunami on the beach.

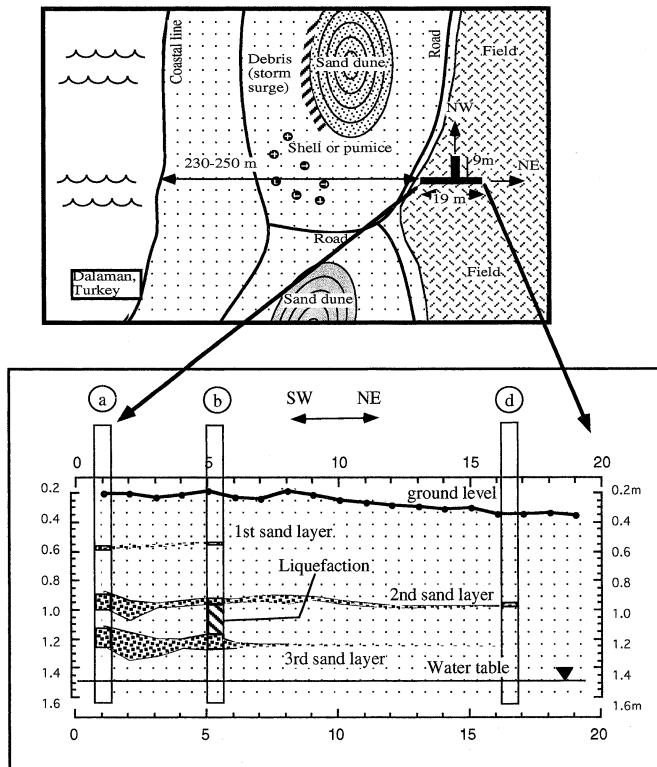


図 8 津波堆積層の断面図（トルコ共和国ダラマン）。

Fig. 8 Sectional profile of the tsunami sand layers observed at Dalaman, Turkey.

且堆積させた砂をもう一度海域へと戻したり、局所的な洗掘を起こしたりする。

平成 3 年（1992）のインドネシア・フローレス島地震津波では、このような堆積過程が詳細に調査され、それによる推定される津波の来襲方向や回数などが津波数値計算結果（ここでは砂移動は考慮されていない）と非常によい一致を示している（Minoura *et al.*, 1997, 2000）。ただし、砂の堆積量に関しては、移動床（砂移動）の数値モデルが行われていないために、今後の検討課題となっている（Takahashi *et al.*, 1993）。

## 2) 歴史的イベントへの適用

これらは最近の津波イベントに限られ、歴史的なイベントに対する適用性は未知のままであったが、平成 8～10 年にわたり地中海を対象とした調査が実施された。トルコ（ダラマンとディディム

の 2 カ所）、ギリシア（サントリーニ島、クレタ島、ロドス島）のエーゲ海に面した地域である。トルコ・ダラマン沖には、ロドス島へ続くヘレナ地震帯が存在し、過去多くの地震が発生している。サントリーニ火山活動もこの地震帯と関係が深い。

調査・測定方法として、まず、現場でトレンチを掘り、堆積層の厚さ、堆積層のレベル、層相の変化、液状化現象などの有無、砂以外の堆積物の有無の確認を行った。海岸線に直交する方向へ 1 つの直線測線部を設けパワーシャベルにより掘削をし、そのあと人力で表面の整形を行い、測定を行っている（図 8 および写真 3 を参照）。室内では持ち帰ったサンプル（津波堆積物）に対し粒度分析を行い、また有機物や炭酸塩に対して加速器質量分析計（名古屋大学年代測定研究センター）による炭素同位体年代測定を行った。なお、津波の



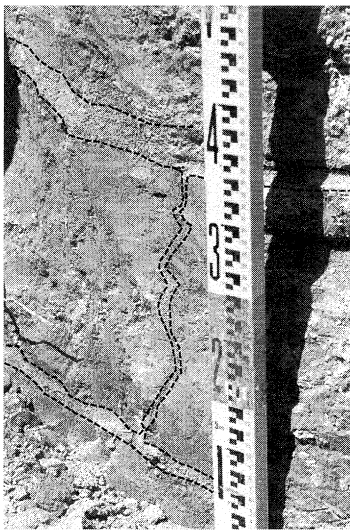


写真 3 津波による堆積層とその間に存在する液状化の跡 (トルコ共和国ダラマン), 図 8 の下図における測線 b を撮影。

Photo 3 Tsunami sand layers and traces of liquefaction observed at Dalaman, Turkey, taken at the line-b in the lower Figure 8.

流体運動性を粒度径組成に見られる微細な変化により調べるためには、非常に詳細な分析が必要であり、ここではストークス法則を応用した沈降管式粒度分析方法により行った。その他、周辺での地形測定として、トレンチの位置、堆積層の位置、標高、傾斜、地形的特徴などを調べている。このような調査により、いつ、どのような津波が来襲したのかという推定ができる。例えば、堆積層に含まれる珊瑚や海中生物の死亡した年代により、津波により陸上に運ばれた年代が推定できる。また、堆積層厚さや層内での砂粒径の大きさにより、流れの掃流力や来襲回数がある程度見積もることができる。ただし、2次元的な津波挙動や定量的な評価については不確実な点が多いので、数値シミュレーションとの融合が不可欠である。

## VI. おわりに

本文は、津波数値シミュレーションによる量的予報、沿岸での被害予測の手法と課題、津波堆積

物による歴史津波の検証などを紹介した。1960年代に始まった津波数値シミュレーションの技術も内容も格段に進歩したと言えるが、未だ基本的な課題である発生機構、陸上遡上、災害の発生過程と定量的な評価などについて、多くの課題が残されている。さらに、人間行動を取り入れたシミュレーションの開発も行われつつある。津波の数値モデルの精度や適用性の向上のためには現地調査は不可欠であり、グローバルな観測結果とともにこれらのデータの利用が重要である。一方、津波の発生頻度が低いこともあり、被害の形態は様々に変貌していることも事実である。沿岸利用や生活様式の急激な変化により、単なる過去のデータ蓄積では予測できない被害要素が増えている。

## 文 献

- 浅井大輔・今村文彦・首藤伸夫・高橋智幸 (1998): 伊豆半島入間における安政東海地震津波の波高と土砂移動. 海岸工学論文集, **45**, 371-375.
- 羽鳥徳太郎 (1984): 津波による家屋の破壊率. 東京大学地震研究所彙報, **59**, 433-439.
- 今村文彦 (1998): 15 年間における津波数値計算の発展と今後. 月刊海洋, 号外, **15** (津波研究の最前線), 89-98.
- 今村文彦・首藤伸夫・後藤智明 (1990): 遠地津波の数値計算に関する研究, その 2 太平洋を伝播する津波の挙動. 地震 2, **43**, 389-402.
- 今村文彦・箕浦幸治・高橋智幸・首藤伸夫 (1997): 最近の津波による土砂移動に関する現地調査. 東北大学工学部津波工学研究報告, **14**, 89-100.
- 今村文彦・鈴木 介・谷口将彦 (2001): 津波避難数値シミュレーション法の開発と北海道奥尻島青苗地区への適用. 自然災害科学, **20**, 183-195.
- 石田祐介・今中 剛・今村文彦 (1998): 三陸沖での新しい監視方法による津波情報提供の可能性. 海岸工学論文集, **45**, 386-390.
- 河田恵昭 (1997): 大規模地震災害による人的被害の予測. 自然災害科学, **16**, 3-13.
- Koshimura, S., Imamura, F. and Shuto, N. (1999): Propagation of obliquely incident tsunamis on a slope, Part I: Amplification of tsunamis on a continental slope. *Coastal Engineering J.*, **41**, 151-164.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫 (1998): GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法. 海岸工学論文集, **45**, 356-360.
- 松富英夫・首藤伸夫 (1994): 津波の浸水深, 流速と家屋被害. 海岸工学論文集, **41**, 246-250.
- Minoura, K., Imamura, F., Takahashi, T. and Shuto, N. (1997): Sequence of sedimentation processes caused by the 1992 Flores tsunami: Evidence

- from Babi island. *Geology*, **25**, 523-526.
- Minoura, K., Imamura, F., Kuran, U., Nakamura, T., Papadopoulos, G.A., Takahashi, T. and Yalciner, A.C. (2000): Discovery of Minoan tsunami deposits. *Geology*, **28**, 59-62.
- 大町達夫・築山 洋・松本浩幸 (1999): 断層運動に伴う動的地盤変位を考慮した津波シミュレーションの評価. 海岸工学論文集, **46**, 321-325.
- 首藤伸夫 (1998): 津波時の土砂移動に関する過去の記録. 東北大学工学部津波工学研究報告, **15**, 1-36.
- 首藤伸夫・後藤智明・今村文彦 (1988): 津波予警報に対する数値シミュレーションの利用. 土木学会論文集, **393**, 181-189.
- 高橋 博ほか (1988): 沿岸災害の予知と防災—津波・高潮にどう備えるか—. 白亜書房, 408p.
- Takahashi, T., Imamura, F. and Shuto, N. (1993): Numerical simulation of topography change due to tsunamis. *Proc. IUGG Tsunami Symp., Wakayama*, 243-255.
- 渡辺偉夫 (1998): 日本被害津波総覧. 東京大学出版会, 238p.
- (2001年8月2日受付, 2001年10月15日受理)