

## 津波現地調査における数値解析の利用

鳴原良典<sup>1</sup>

Yoshinori SHIGIHARA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>防衛大学校システム工学群建設環境工学科

本稿では、津波現地調査に利用される数値解析技術についてその現状についてまとめる。現在、世界各地で津波が発生すると直ちに数値解析が実施され、地震が発生してから24時間以内には暫定的な結果として公開される。この結果が調査活動のための事前資料となる。津波に関する諸情報は数値解析結果のみならず現地調査結果などもホームページ上で随時更新され、情報が容易に共有できるようになった。また、津波数値解析に用いる数値モデルやその他必要な条件について概説する。さらに解析結果の応用について、過去の津波イベントで利用した結果を例に挙げ、現在のシステムでの現状について述べる。

### 1. はじめに

津波災害は前触れもなく突発的に発生する。そしてその現地調査には十分に安全を確保し、復旧・救援活動に迷惑をかけないように、できるだけ早く現地に入るのが基本である。しかしながら、災害直後における現地からの情報は断片的で不足しているのが常であるため、決められた期間において調査対象や地域を選定することが難しく、このことが調査の正否を左右する重要な要素となっている。

1980年代に首藤ら<sup>1)</sup>によって確立された津波の数値解析手法は、日本のみならず世界各地での津波予報や被害想定に利用されるようになったが、それと同時に、津波現地調査を効果的に行うための重要なツールの一つとなり、現在まで活用されている。そこで本文では、津波現地調査に利用される数値解析技術についてその現状について述べる。

### 2. 津波現地調査の意義

津波研究で最も大きな課題として残っているのは、海底地震に伴い生じる津波を発生段階において予測・再現すること、すなわち、初期波形を精度良く決定することである。これは、地震情報から推定できるようにはなったものの、一意的に確定するには至っていない。津波初期波形の推定には、地震情報から暫定的な断層パラメータを決定して津波伝播の数値解析を実施し、この結果を現地で得られる数少ないデータと検証することによって、試行錯誤的に得られるのが一般的である。

解析結果と比較するためのデータとして、潮位計による水位変動の記録はその数少ない情報の一つである。これは、外洋から伝播する津波そのものを捉えているといえるが、潮位計は設置箇所数自体が少なく、また定点観測データであるため、解析結果の検証をこれだけにより判断するのは不十分である。したがって、津波の規模を

知るための情報として、津波が沿岸に影響を与えた範囲を明らかにすることが必要となる。

沿岸の津波の空間分布を知るための手段としては、現地調査を実施して津波痕跡高を測定するのが一般的である。すなわち、実際に津波の被害を受けた地域に赴き、そこで津波が浸水した証拠を見つけ、高さを測定するのである。ただし、津波痕跡高は観測地点において来襲した津波の水位が最も高い位置を示した値であるため、時間的な情報はないことに注意する。よって、初期波源を推定する場合は痕跡高と潮位記録の両方を検証データとして使用しなければならない。

なお、2004年スマトラ沖地震津波のように、数多くの目撃証言や撮影された津波来襲のビデオ映像も津波の現象解明に重要なデータとなりうるが、津波波源の検証に必要な定量的データであるとはいえない。また、津波は時間や天候に関係なく発生するから、常にこのようなデータが得られるとは限らない。

### 3. 津波現地調査に利用される数値解析法の詳細

ここでは、実際に津波現地調査の参照のために利用されている数値解析について概説する。津波の数値解析に必要な要素は大きく分けて、津波伝播モデル、水深データ（地形条件）、さらに地震情報から推定した断層パラメータによる津波の初期水位の設定（外力条件）、などが挙げられる。これらの各要素に関して、その特徴や問題点について述べる。

#### (1) 数値モデル

津波は主に、水深数 km の海中で数十～数百 km という空間的広がりを持つ地盤の変動により発生するため、水深（鉛直方向）のスケールよりも水平方向のスケールが十分大きい波である。そのため、津波の現象の多くの部分は長波理論式で記述することができる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad [1]$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad [2]$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad [3]$$

ここに、 $\eta$  は水位、 $D$  は全水深、 $g$  は重力加速度、 $n$  は Manning の粗度係数、 $M$  と  $N$  はそれぞれ  $x$  方向と  $y$  方向の線流量である。[1]式が連続の式、[2]と[3]式がそれぞれ  $x$  方向、 $y$  方向の運動量保存則を表している。これらの支配方程式を解く手法としては、構造格子を用いた有限差分法が使用される<sup>2)</sup>。差分スキームは Staggered Leap-frog 法が一般的である。

現地調査の計画段階や、実施中での数値解析結果には特に速報性が望まれる。そのため、暫定的な解を得るために使用される数値モデルは、運動量保存則から移流項、海底摩擦項を無視し、圧力項の  $D$  を静水深  $h$  に近似した線形長波理論が用いられることが多い。非線形長波理論による解析よりは精度が劣るものの、特に計算負担の大きい移流項を無視することによって計算時間が大幅に短縮できる。

なお、2004 年スマトラ沖地震津波のように波動伝播が地球規模に及ぶような遠地津波を扱う場合は、地球の丸みを考慮した極座標系を使う必要があり、コリオリ力も考慮しなければならない。

## (2) 水深データ

津波数値解析での地形条件は、精度の良い結果を得るための重要な要素である。水深データは、研究機関によって既に作成・配布されているものが利用される。

一般的に入手可能なデータとして、米国地球物理学データセンターが配布している 2 分格子の水深データ、ETOPO2<sup>3)</sup> が広く利用されている。また、最近では 1 分格子のデータとして英国海洋センターが提供している GEBCO デジタルアトラス<sup>4)</sup> が購入可能であり、現在入手可能な水深データの中では最も精度が良いと思われる。

本来、津波は沿岸に近づくにつれて伝播速度が小さくなり、波長が短くなる。そのため、水深分布に応じて空間格子を小さくする必要があるが、沿岸の水深データは一般に提供されるものはほとんどないため、必要な部分を海図などからデジタルデータを作成しなければならない。

よって、津波現地調査の事前の数値解析には、上記の水深データを用いて外洋から沿岸までの計算を一括に実施する。沿岸部での詳細な地形情報がない状態で計算を実施するため、計算結果には信頼性に多少の問題があることに注意する必要があるが、伝播の指向性や波高の大きい地域など、おおまかな津波の特性は把握することができる。

## (3) 外力条件 (初期条件)

津波の発生要因の 9 割は海底地震であるので、ここでは断層パラメータによって初期条件として水位変動を与えることを考える。なお、他の発生要因として地滑りや火山噴火などがあり<sup>5)</sup>、研究レベルの範囲内でいくつかの数値モデルも提案されているが、未だ実用化には至っていない。

地震が発生するとともに、Harvard 大や東大地震研な

どの研究機関が CMT 解を公表する。それを基にして断層パラメータを決定し、Mansinha and Smylie<sup>6)</sup>の方法や Okada<sup>7)</sup>の方法を適用して海底地盤の変動を求め、これと海面変動が一致するとして、津波の初期波形となる。なお、これらは地震情報から推定して設定するため、数値解析による解は暫定的なものにすぎない。現地調査の結果と比較することにより、より正確なパラメータに修正される (4. (2) 参照)。

## (4) 解析結果の整理

数値解析を行うと大量の情報が生まれるが、コンピュータのメモリの限界も考慮して必要なデータのみを出力しなければならない。計算結果の表示としては、(i) 沿岸での最高水位分布、(ii) 特定地点での水面変動および流量フラックス (流速) の時刻歴、(iii) 動画化、などが挙げられる。

図 1 はスマトラ沖地震津波の推定波源による最高水位分布である。波源短軸方向であるインドネシア、タイ、スリランカ、インド、モルディブに特に水位が高くなっていることがわかる。これらの結果は、津波発生直後の被災情報が不足していた段階で、現地調査の計画に非常に有益となった。

また、図 2 は動画での津波伝播の例である。解析結果を動画化することによって、海底地形に対する津波の伝播・変形過程や、場所による最高水位、伝播速度の違いが容易に理解でき、計算結果全ての情報を表示されるといえる。

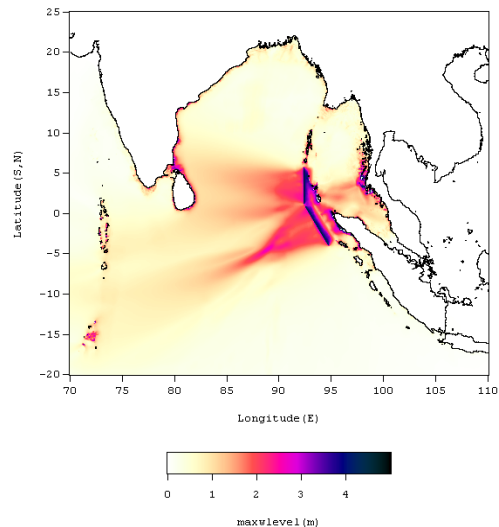


図 1 推定津波波源による最高水位分布

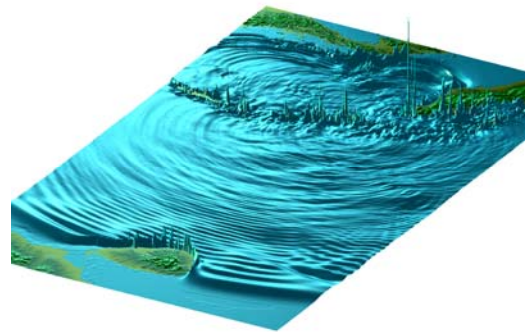


図 2 津波伝播の 3 次元表示 (動画の表示例)

## 4. 数値解析の実用例

### (1) 数値解析を利用した最初の調査事例

数値解析結果を参照しながら現地調査を行った最初の事例は、1992年ニカラグア地震津波である。調査に入る前の一ヶ月間で数値解析を行い、その結果から重点的に調査をする地域を選定した。当時、太平洋沿岸中央部に位置するMasachapaでの被害が大きく報道されたが、数値解析結果ではその北部で最も高い数値を出した。実際、20km北部のEl Transitoの被災が最大であり、10mの津波高を測定した。この場所は、現地へのアクセスがきわめて悪かったため、報道が全く行われていなかった。被災地の中には情報伝達の遅い地域があり、このような場所を予め数値解析により推定することは現地調査において大変重要である。

### (2) リアルタイム津波数値解析

数値解析を利用することによって、現在ではさらに発展した方法が実施されている。現地での調査結果をリアルタイムで数値モデルに入力し、津波の初期波形モデルを逐次修正する方法である。この方法が最初に適用されたイベントは1993年北海道南西沖地震津波である。津波の発生直後から数値解析にとりかかり、得られた解析結果を毎日の現地調査と比較し、調査ポイントを連絡しながら現地調査を進めた。その結果、計算と現地調査の違いがより明確になり、発生モデルの解明や沿岸での津波挙動の理解に役立った。なお、当時の連絡手段は電話やファクシミリであった。

現在では通信技術の発達により、地震の発生機構をインターネットを通じて即座に知ることが可能となった。そのため、世界各地で津波が発生すると、各研究機関で直ちに数値解析が実施され、地震が発生してから24時間以内には暫定的な結果として各機関のホームページ上で公開される。この結果が調査活動のための事前資料となっている。

2003年十勝沖地震津波では、地震発生直後にウェブサイトを立て、数値解析結果のみならず各研究機関の地震に関する情報や被災状況の報道に関する情報(図3)、さらに現地調査結果が随時更新された(図4)。これは、2004年の東海地震津波やスマトラ沖地震津波でも同様の形式で実施され、今後も、速報性や情報を共有する場合において最もスタンダードな方法となるであろう。

## 5. 2004年スマトラ沖地震津波

2004年12月26日に発生したスマトラ沖地震津波はインド洋全域に被害が及び、犠牲者が30万人を超える史上最大の津波災害となった。直ちに実施された数値解析の結果(図1)から、特に被害の大きい地域が特定され、タイやスリランカなど現地入り可能な国での調査計画が行われた。従来、国際津波調査は災害発生から2週間を目処に現地と連絡調整しながら実施している。ただし、今回の場合は被害の甚大さ、場所によって復旧作業の速い可能性があり、例外的に1週間を待たずに現地調査を実施した。

今回の津波の大きな特徴としては、潮位計による水位

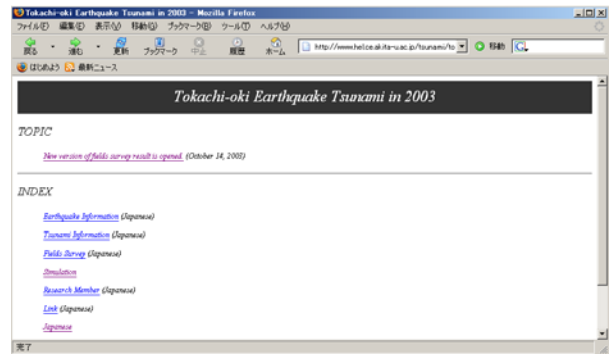


図3 2003年十勝沖地震情報(秋田大学より<sup>8)</sup>)



図4 津波痕跡高調査結果(秋田大学より<sup>8)</sup>)

変動や、現地調査による津波痕跡高以外にも様々な種類の物理データが得られていることが挙げられる。特に人工衛星によって数多くの記録が残された。例えば、被災地沿岸での衛星画像では、津波来襲前後の画像が記録されており、これらと比較することで津波の氾濫域がかなり高精度に特定でき、津波遡上計算での検証データとして用いることが期待できる。さらに、津波発生時に偶然インド洋上空を通過中であった衛星 Jason1 は、搭載された海面高度計によって津波伝播時の海面変動を捉えることに成功している。図5に地震発生から2時間後の Jason1 軌道と津波の位置関係を示す。ここで Jason1 は南西から北東方向に向かって移動している。図6は数値解析結果との比較であり、今回の津波で得られたデータは、本イベントでの波源モデルの精度を検証する上で非常に重要であるといえる。今後は、リモートセンシング技術を利用して津波発生時や伝播途中の津波を面的に捉えることができれば、津波発生メカニズム解明に大きな進歩をもたらすであろう。

現時点での本イベントの問題点としては、沿岸での詳細な水深データが不足していることがある。場所によっては海図が手に入らない地域もあり、デジタルデータを作成することも困難である。今後、インド洋だけでなく他の海域でも、巨大津波が発生する可能性のある地域について海底地形の調査を実施するプロジェクトを立ち上げ、水深データの使用環境を整備することが重要であるといえる。

## 5. おわりに

本稿では、津波現地調査における数値解析の利用について、解析方法の概説と実際の応用について述べた。津波数値解析技術の確立により、津波発生後に公開される地震情報から初期波源を推定し、暫定的ではあるが、各地における津波波高を得ることができる。これらは現地からの情報が十分でない段階でも、現地調査の事前資料として、大変多くの情報を我々に与えてくれる。さらに、近年ではインターネットなどの通信技術の向上によって、津波に関する情報が即座に集約・共有することができるようになり、新たな災害に対しても、この傾向はさらに続いてゆくものと思われる。

スマトラ沖地震では、津波波源の検証データとして従来得られてきた痕跡高や潮位記録以外にも、衛星画像や津波伝播時の水位など、様々な物理データを得ることができた。今後、GPS津波計などに代表される観測手法を駆使することによって、より精度の高いデータを得ることが期待できる。

## 参考文献

- 1) 首藤伸夫, 後藤智明, 今村文彦: 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, 第 393 号/II-9, pp.181-189, 1988.
- 2) 後藤智明, 小川由信: Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学土木工学科, 52p, 1982.
- 3) 米国地球物理学データセンター (National Geophysical Data Center) のウェブサイト: <http://www.ngdc.noaa.gov/>
- 4) 英国海洋センター (British Oceanographic Data Centre) のウェブサイト: <http://www.bodc.ac.uk/>
- 5) 今村文彦, 李昊俊: 津波発生・伝播の数値モデルの現状と課題, 沿岸海洋研究, 第 36 巻, 第 1 号, pp.91-101, 1998.
- 6) Mansinha, L. and Smylie, D. E.: The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440, 1971.
- 7) Okada, Y., Surface deformation due to shear and tensile faults in a

half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.75, No.4, pp.1135-1154, 1985.

- 8) 2003 年十勝沖地震津波の情報に関するウェブサイト: <http://www.hel.ce.akita-u.ac.jp/tsunami/tokachi2003/index.html>

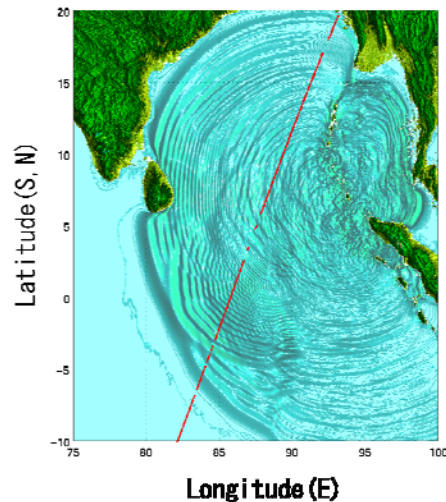


図5 Jason1 軌道と津波の位置関係

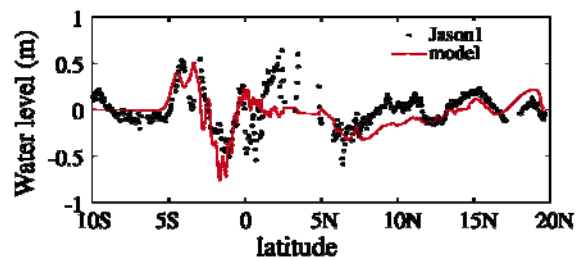


図6 海面高度計データと数値解析との比較