

津波予報への数値シミュレーション技術の活用

林 豊（気象研究所）

1. はじめに

日本気象学会主催で2007年8月4~5日に、第41回夏季大学「新しい気象学」が「気象のシミュレーション」というテーマで開講され、この中で「津波の数値シミュレーション技術の活用」と題する講義が設けられた。この講義では、津波の発生と伝播の特性、津波数値計算技術、またそれを活用した気象庁の量的津波予報の仕組みなどを取り上げた。本稿は、その講義概要である。

1.1 津波とは

海底地盤の変動によって海面に凹凸が生じると、周辺との水位の違いで水圧差が生じる。すると、周りの水が動かされ、海上を水の波として伝わる。特に、岸に近づくと波高が高くなる。これが津波である。火山噴火、海底地すべりによっても、津波が発生することがあるが、日本沿岸で観測される津波の9割以上は、海域での巨大地震の発生が原因であり、以下では、地震に伴う津波について述べる。

1.2 津波の特性

巨大地震に伴う津波の代表的な初期波形は、波長が数百 km、波高が数 m 程度であり、波源での水深は数千 m である。水深と波長の比は小さく、津波は長波(浅水波)理論で近似される挙動を示す。なお、沿岸域で見られ、長波の性質を持つ海象としては、他に、(いずれも津波と成因は異なるが、)高潮と潮汐が挙げられる。

また、深海部においては、波高と水深比が小さい微小振幅の波と考えてよい。この場合、津波の位相速度 v は、重力加速度 g と水深 h を用いて、 $v = \sqrt{gh}$ で近似でき、ほぼ水深だけで決まる。

1.3 日本の津波発生源

日本列島は、フィリピン海プレート、太平洋プレートと陸側のプレートの境界付近に位置する(図1)。これらプレートの境界で発生する巨大地震が、日本では、主要な津波発生要因となっている。海岸から比較的近い場所に、主要な発生源があることが、日本の津波の特徴であり、地震発生から津波の到達までの時間は、早い場所では数分から数十分の場合が多く、防災に有効な津波予報を発表するために与えられる猶予が短いという制約がある。

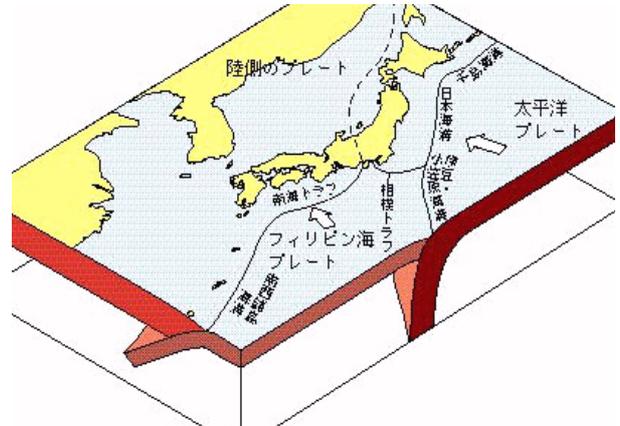


図1 日本の周辺のプレート(地震調査研究推進本部地震調査委員会「日本の地震活動」より)

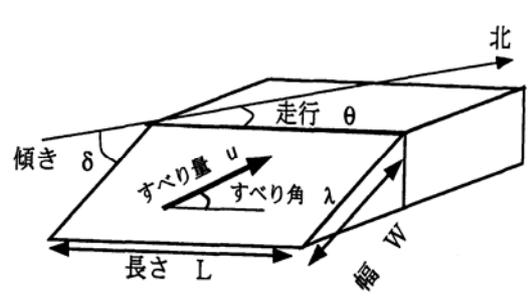


図2 地震断層の幾何学的パラメータ

2. 津波の数値計算

津波の数値計算技術は、津波の伝播過程を研究したり、観測値から逆解析で地震のメカニズムを研究する手段(Satake, 1995)として用いられる。次節で述べるように、量的津波予報にも応用されている(館畑, 1998)。

地震に伴う津波を数値計算するには、初期条件として地震直後の震源域直上付近の海面の状態を設定する。そこから、運動方程式と連続の式を差分化した方程式群を用いて、時間について数値積分する(例えば、後藤・佐藤, 1993)。

2.1 初期条件

地震を半無限弾性体内の矩形断層の運動であると仮定し、断層運動の特徴を表わす幾何学的パラメータ(図2)を定めれば、海底面の変形を理論的に計算することができる(Manshinha and Smylie, 1971)。

なお、海底の地殻変動の及ぶ水平スケールが水深

に比べて十分に大きいので、海面の初期変位は、計算された海底面の鉛直変位と等しいと考えればよい。

断層平面内を一様にすべる断層活動を考えた場合、波源域における津波はおおむね一山一谷の形になる。

2.2 津波の運動の支配方程式

津波の運動は、水深と波長の比が小さいとして、長波（浅水）理論が適用できる。この場合、水平流速が鉛直方向に一様な分布となる。海底から水面までを鉛直方向に積分した形で、連続の式と運動方程式を次の方程式系（非線形長波理論式）で表すことができる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial}{\partial x} + \frac{f}{D^2} MQ &= 0 \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial}{\partial y} + \frac{f}{D^2} NQ &= 0 \end{aligned}$$

ここで、 η ：海面の上下変動、 h ：静水深、 $D=h+\eta$ 、 g ：重力加速度、 f ：摩擦係数、 M, N ： x, y 方向の流量フラックス、 $Q = \sqrt{M^2 + N^2}$

津波の波源域から沖合まで（海岸近く以外）では、より簡単な線形長波の方程式群で、十分に津波の運動を表現できる。つまり、水深が深い領域での海底摩擦の影響が小さいと考えてよく、また、波高と水深の比が小さいので微小振幅の波として取り扱える。線形長波の方程式系は次のとおりである。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} &= 0, \quad \frac{\partial N}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \end{aligned}$$

3 津波数値計算技術の量的津波予報への活用

気象庁では 1999 年から量的津波予報を実施している。この予報には、地震観測による震源の位置とマグニチュード(M)を用いて、量的津波データベースから、あらかじめ計算していた津波数値計算結果を検索して、利用する方法が採られている（館畑, 1998）。日本近海で発生する地震についても、太平洋の遠く離れた場所で発生する地震についても、仕様は異なるが、原理としてはほぼ同様のデータベースが使われている。

事前計算方式を採るのは、地震の発生後、地震観測結果から断層パラメータが解析された後に、津波数値計算を開始したのでは、津波到達に間に合わせ

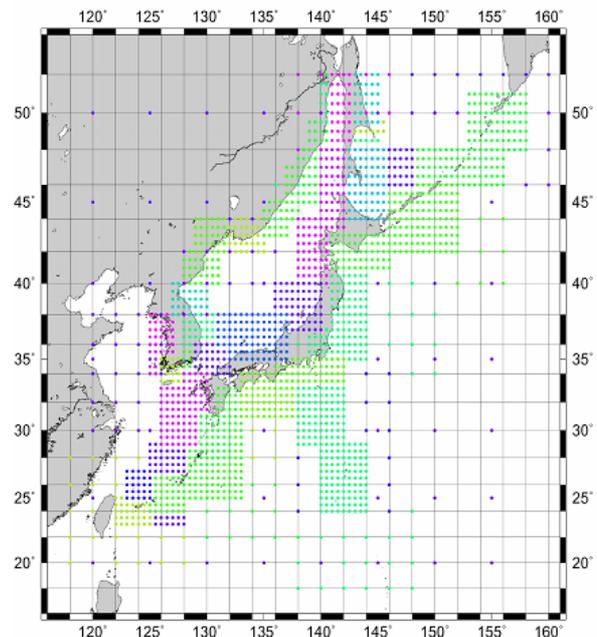


図 3 量的津波データベース作成に用いられた想定断層の位置の分布（気象庁地震火山部作成）

て計算を終えることが極めて困難であるためである。

3.1 量的津波データベースの仕様

日本近海の地震による量的津波データベースは、領域によって、5度、1度、0.5度、0.2度のいずれかの間隔で想定断層をおき、各断層の運動を仮定して、線形長波の方程式群によって津波数値計算が行なわれている（図3）。Mと深さも、各位置とも複数ケースで計算されている。

3.2 想定断層のパラメータ

断層パラメータのうち、長さ L (m)、幅 W (m)、すべり量 U (m)については、地震のスケール則をもとに M に応じて次のように与えられている。

$$\begin{aligned} \log_{10} L &= 0.5M + 1.1 \\ W &= 0.5L \\ \log_{10} U &= 0.5M - 3.2 \end{aligned}$$

また、断層の走行は海溝軸に平行なものとし、断層運動の種類として、傾斜角が異なる逆断層三種と横ずれ断層が設定されている。

3.3 海岸での津波の高さの換算

線形長波の方程式系は、多くの計算機資源を要求されないため、多数例の計算には都合がよいが、海岸近くの津波の挙動を計算することはできない。そこで、沖合に予測地点（GP）を置き、線形長波の方程式系でGPの位置に対して計算された津波の高さ

を用いて、グリーンの法則により、海岸近くでの津波の高さに換算する方法が用いられている（図4）。

$$H = \sqrt[4]{\frac{h_1}{h}} H_1 \rightarrow \sqrt[4]{h_1} H_1$$

ここで、 H ：海岸付近での津波の高さ、 h ：沿岸での水深（ここでは1mとする）、 H_1 ：GPでの津波の高さ、 h_1 ：GPの水深。

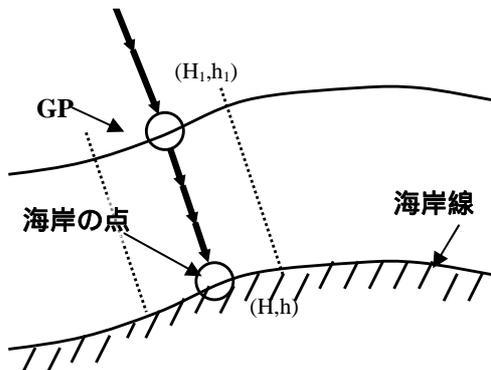


図4 沖合予測地点を用いた津波の高さの換算の概念図

3.4 データベースの検索

上述の方法であらかじめ数十万通りの地震の発生を想定して津波の挙動を計算された結果は、量的津波データベースにまとめられている。この中から、地震発生直後に推定した震源の位置、地震のMに近い条件での計算結果が検索され、検索結果から予測値（津波の高さ、到達予想時刻）を作り、これに基づいて津波予報が発表される。

その際、地震発生機構のリアルタイム解析が完了する前の段階で発表する津波の第一報では、傾斜角45度の逆断層を仮定した計算結果が用いられる。これは、傾斜が低角な逆断層や横ずれ断層より津波を起こしやすい地震発生機構を仮定することで、防災上の安全側に立った選択である。また、全く同じ震源・Mでの計算結果がデータベースに収録されているとは限らないので、類似のパラメータによる計算結果から、津波の高さが過小評価になりにくいように予測値を選ぶ工夫がなされている。

4. 津波数値計算技術を活用した地震・津波発生機構の研究

津波数値計算技術は、地震や津波の発生機構を解明するための基礎技術として活用されている。講義ではその一例として、2003年十勝沖地震の津波遡上高分布から津波発生機構を解明しようとする研究の

概要（長谷川・林, 2005）を紹介した。本稿では、詳細は省略する。

5. 津波予測の高度化

2006年10月からは、緊急地震速報の震源とマグニチュードが津波予報にも活用されることになり、2007年能登半島沖地震の際には、地震から2分以内に津波予報が発表された。

2007年7月には、日本近海用の量的津波データベースに、傾斜の異なる逆断層と横ずれ断層の計算結果が収録された。適用された予報例はまだないが、このデータベースの改善により、地震の発生機構によっては、地震後十数分の段階で津波予報を適切に修正・解除できる場合があると期待されている。

将来の津波予報の高度化に向けては、津波が海岸に到達する前に、沖合の海底水圧計や沿岸の波浪計で津波を観測し、地震に加えて津波の観測結果に基づいた予報を可能にするデータ同化技術などが有望視されている。詳しくは、平田(2005)によるレビューなどを参照されたい。

文献

後藤智明・佐藤一央, 1993: 三陸海岸を対象とした津波数値計算システムの開発, 港湾技術研究所報告, **32**(2), 3-44.

長谷川洋平・林 豊, 2005: 津波遡上高の詳細解析に基づく津波発生機構の解明, 気象庁技術報告, 126, 65-72.

Manshinha, L., and D.E. Smylie, 1971: The displacement fields of inclined faults, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **61**, 1433-1440.

Satake, K., 1995: Linear and nonlinear computations for the 1992 Nicaragua earthquake tsunami, *Pure Appl. Geophys.*, **144**, 445-470.

総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会編, 1997: 日本の地震活動 - 被害地震から見た地域別の特徴 -, pp.20.

館畑秀衛, 1998: 津波数値計算技術の津波予報への応用, 月刊海洋, 号外 15, 23-30.

平田賢治, 2005: 津波予測 - リアルタイム津波予測を中心に -, 月刊地球, **37**(3), 159-165.