

# 地震-津波の連成シミュレーション

齊藤竜彦<sup>1,2</sup>, 古村孝志<sup>1,2</sup>

東京大学地震研究所<sup>1</sup>, 科学技術振興機構 CREST<sup>2</sup>

[saito-ta, furumura]@eri.u-tokyo.ac.jp

**概要:** 大規模並列計算による地震-津波の連成シミュレーション法の開発を行った。現在標準的に用いられている簡便な津波計算法とは異なり、(1) 複雑な海底地質構造を考慮した海底変動の評価、(2) 3次元 Navier-Stokes 方程式を解くことによる津波の発生と伝播を結合したシミュレーションを、この手法では取り入れている。これによって、これまで正確な津波予測が困難であった「大津波地震」や、「津波を起こさない地震」を含め、日本近海における地震津波の発生・伝播過程を正確に評価することが可能になると期待される。

## 1 はじめに

海底下で大地震が起きると海底地殻変動により津波が発生する。海に取り囲まれた日本では、これまで大津波による被害がたびたび起きており、津波の高精度予測は、災害軽減のための非常に重要な課題である。

2007年8月2日に発生したサハリンの地震では、津波警報が発令されなかったにも関わらず、稚内で50cmの津波を観測したことが問題となった。また、2007年1月13日の千島列島の地震では、津波波高が予想の1/3以下と小さかったことが、津波予測の信頼性を損なう別の問題を引き起こした。

津波予測の高度化には、(1) 津波源となる海底変動の正しい見積もりと、(2) 津波伝播過程の正確な評価、の2つが不可欠である。

海底変動の計算には、簡便のために、均質媒質中の断層運動による海底変動を求めるのが一般的である。ところが実際には、海溝付近では柔らかい堆積物(付加体)が厚く堆積するなど、複雑な地下構造を有しており、断層滑りが海溝の浅い部分にまで達した場合には、大きな海底隆起が発生し、大津波が起こる恐れがある。これらの不均質効果を正しく評価するためには、海溝～陸の3次元不均質地下構造を正確にモデル化し、弾性体の運動方程式の数値計算により、地震動および海底変動分布を正確に求めることが必要である。

また、従来の線形長波方程式を用いた簡便な津波伝播計算法にも限界が見えてきた。例えば、日本海溝～千島海溝の水深は最大10,000mに達し、ここを伝わる津波は強い分散を起こす。そのため、方位によっては急激に震幅が弱まるほか、数十kmを超えるような長い津波波群を作り出す。このような効果は、線形長波方程式では評価することができず、Navier-Stokes 方程式

を用いた海水流れの計算によって、はじめて厳密にシミュレートすることができる。

本研究の目的は、地震動と津波の2つの大規模並列数値シミュレーションの連成により、大地震による強い揺れと津波を正確に予測するための新しいシミュレーション法を確立することにある。

## 2 地震-津波連成シミュレーション

海溝付近の複雑な地下構造における地震動と海底変動分布は、弾性体運動方程式と応力-歪みの構成方程式の高次並列差分法(FDM)計算

(Furumura and Chen, 2005) から求める。地下構造モデルには、空気、海水、そして近年の海陸地下構造調査から求められた堆積層、地殻・マントル、プレートの境界面形状と物性値(剛性率、密度、非弾性定数)を、200~500m程度の細かな分解能で組み込む。なお、並列計算は鉛直方向の1次元領域分割に基づき、領域間の波動伝播はMPIを用いたデータ通信により行う。計算の進行により、海底面では強い地震動が発生し、海底変動が徐々に現れる。

次に、得られた海底変動が起こす海水の運動と海面の時間変動を、Navier-Stokes 方程式の差分計算から評価する。ここでは、流体計算で実績のあるSOLA-SURF法(Hirt et al., 1975)を用いて海面の時間変動を評価する。3次元計算領域を水平方向に領域分割し、MPIを用いた並列計算を行う。本計算では、地震から津波の一方向の連成(弱連成)を考え、津波が地震動に与える影響は考慮しない。

## 3 シミュレーション例

地震-津波連成計算の一例として、1944年東南海地震(M8.1)の計算結果を紹介する。この巨大地震では、死者・行方不明者は1251名に達

し、津波により約 3000 家屋が流出、12,000 家屋が浸水被害を被った。南海トラフでは 100 年間で巨大地震が繰り返し発生しており、今後 30 年以内に次の東南海地震の発生する確率は 60%とされている。

まず、地震動のシミュレーションでは、紀伊半島から関東を含む 500km x 1000km x 200km を水平 0.4km、鉛直 0.2km の間隔で離散化し、南海トラフの地下構造・プレートモデルの物性値（馬場・他, 2006）を組み込んだ。東南海地震の断層モデルは、近地強震動の波形解析から求められた山中（2004）の結果を用いた。地球シミュレータ 32 ノード（256CPU）による並列計算によって、2 分間の地震波伝播の計算に 2 時間を要した。地震波動伝播のスナップショットを図 1 に示す。紀伊半島沖から破壊が始まり、北東方向へ破壊し、強い揺れが広がる様子がみとれる。

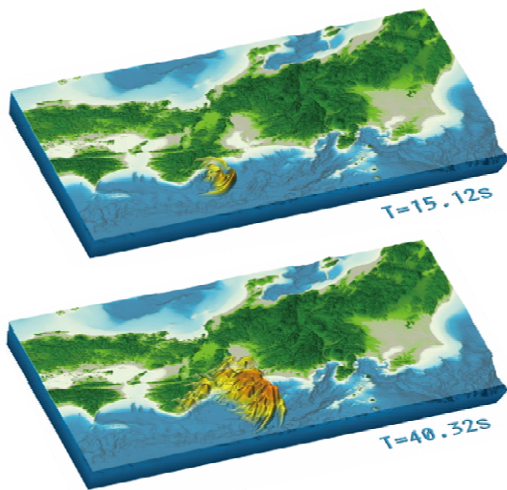


図 1 1944 年東南海地震の地震動シミュレーション。

計算で得られた海底変動を用いて、津波計算を行った。海底地形データを取り入れた海水部分を水平 1km、鉛直 0.1m の格子間隔で離散化し、海水運動を Navier-Stokes 方程式の数値計算により評価した。SOLA-SURF 法による流体計算では、ベクトル長さが短くベクトル効率を高めることが難しいため、現時点ではスカラー計算機（PC クラスタ）により計算を行っている。32CPU の AMD Opteron を用いた 2 時間分の津波伝播計算には 4 時間を要した。津波伝播のスナップショットを図 2 に示す。紀伊半島から伊勢湾にかけて、波高の高い津波が到達する。

#### 4 今後の課題

これまでの津波計算では、均質媒質を仮定した海底変動の見積もりや、線形長波方程式を用いた津波伝播の評価など、大幅な近似が導入

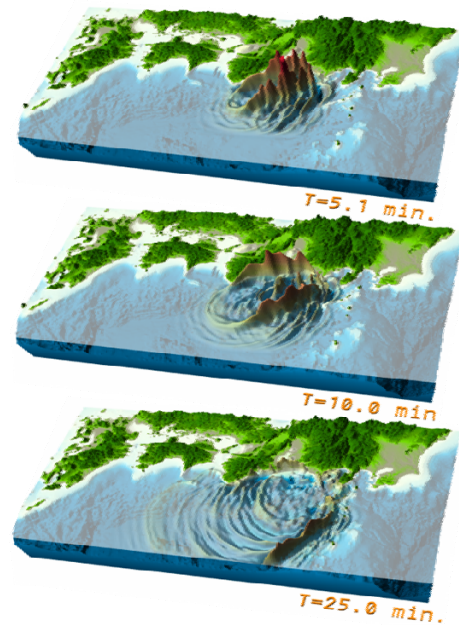


図 2 地震—津波連成シミュレーションによる 1944 年東南海地震の津波伝播。

されていた。多くの海溝型地震では、断層のまわりの地下構造は比較的不均質性が弱く、かつ水深が浅い海域（2000m 程度以下）を伝わる津波には、これらの近似がよく成立した。しかし、少数ではあるが、「大津波を引き起こす地震」や「波高が激しく減衰する津波」など近似方程式では正確に記述できない、例外がある。これらの特殊事例が、1896 年明治三陸津波地震のように、22,000 名もの死者をもたらす大惨事を起こし、あるいは津波波高の過大評価による津波警報の誤報といった信頼性を損なう問題を起しているといえよう。

大規模並列計算に基づく地震—津波連成シミュレーションによって、津波予測を高精度化するともに、従来の近似計算の適用性とその限界を明らかにすることが、これからの津波防災の実用化のため重要な課題である。

#### 参考文献

- [1] 馬場俊孝, 伊藤亜紀, 金田義行, 早川俊彦, 古村孝志, 制御地震探査結果から構築した日本周辺海域下の 3 次元地震波速度構造モデル, 日本地球惑星科学連合大会講演予稿集, 2006.
- [2] Furumura, T. and L. Chen, Parallel simulation of strong ground motions during recent and historical damaging earthquakes in Tokyo, Japan, *Parallel Computing* 31, 149-165, 2005.
- [3] Hirt, C. W., B.D. Nichols, and N. C. Romero, SOLA- A Numerical solution algorithm for transient fluid flows, Los Alamos National Laboratory report LA-5852, 1975.
- [4] 山中佳子, 1944 年東南海地震と 1945 年三河地震の震源過程, *月刊地球*, 26, 739-745, 2000.