

地震と津波の統合シミュレーション法の大規模並列計算 Large-scale FDM Simulation of Seismic Waves and Tsunamis based on Seismic-Tsunami Compound Equation

前田 拓人^{1*}, 古村 孝志¹
Takuto Maeda^{1*}, Takashi Furumura¹

¹ 東大総合防災情報研究センター / 地震研究所

¹ CIDIR/ERI, The University of Tokyo

1. はじめに

海溝型地震発生時には、高周波地震波や海中音波に加えて、長周期地震動から津波まで、様々な周期帯を持つ波動現象が同時に観測される。我々は、このような広帯域の波動現象を統一的に評価するための「地震・津波統合シミュレーション」の開発と、計算精度の検証をこれまで行ってきた(前田・古村, 2010; Maeda and Furumura, 2011)。本研究では、同シミュレーションコードを用いた地震・津波統合シミュレーションの実用化を目指し、計算コードの並列化を行うとともに、実際の地下構造モデルを用いて 2004 年紀伊半島南東沖地震の地震等の大規模並列シミュレーションを実施し、その有効性を確認した。

2. 地震・津波の統合シミュレーション法による大規模並列計算

地震・津波統合シミュレーション法 (Maeda and Furumura, 2011) は、流体の存在を考慮した重力場中の運動方程式を差分法により直接解くものである。弾性体と海中の応力場を重力と平衡する準静的な項と動的な項に分解し、かつ水面における変位分布が重力と圧力勾配との間の平衡に及ぼす効果を運動方程式に陽に取り入れることにより、津波の発生伝播が安定かつ正確に評価される。こうして再現された分散性津波波形は、Navier-Stokes 方程式に基づく津波計算の結果ときわめて良く一致することを確認している。

本研究では、この手法による大規模なシミュレーションの実現をめざし、領域分割に基づく並列計算コードを開発した。3次元媒質を水平・鉛直方向に分割し、各小領域を多数のCPU(コア)に割り当てる。1タイムステップの計算ごとに各領域の端の計算結果を隣接領域間でMPI通信を用いて交換して最新データを共有する。加えて本計算コードの並列化には、海水面の空間変動から計算される物理量を鉛直下方にある全計算領域に渡すための一斉通信(集合通信)が新たに必要になる。

東京大学情報基盤センターのHA8000クラスタシステムにおいて本コードの性能測定を行った。本システムは、1ノードあたり4CPU(16コア)を持つマルチコアクラスタである。計算モデルサイズを512x512x256に固定し、コア数の増大に伴う計算時間の短縮を測定した。ここでは、全コア間をMPIにより一様に並列化するFLAT MPI手法を用いた。16コアから4096コアまで順次実験を繰り返し、計算時間の短縮から高い並列化率(99.839%)の実現を確認した。

3. 2004年紀伊半島沖地震の大規模シミュレーション

本並列計算コードを用い、2004年紀伊半島南島沖地震(M7.4)の大規模地震・津波同時シミュレーションを行った。計算領域は紀伊半島から四国沖の460km x 307km x 115kmの領域を選び、水平方向300m、鉛直方向150mの分解能で離散化した。地下構造モデル作成には、海底地形にJ-EGG500、陸域の標高値に国土地理院500mメッシュ、地盤構造としてJ-SHIS深部地盤構造、モホ面およびプレート境界データとして大大特プロジェクトの結果をそれぞれ用いた。震源モデルとしては、山中(2004)およびSaito and Furumura(2009)を参考にして有限サイズの断層面を設定し、破壊伝播速度2.3 km/sを仮定して多数の点震源群から地震波を放射させた。

シミュレーションの結果、高周波地震動および海中音波の励起と同時に、地震動の近地頂により形成された海面変動が重力を復元力として津波として伝播していく様子が確認された。特に地震動が海底で変換して生ずる海中音波の挙動は複雑であり、海底面の傾斜により水深の深い側にエネルギーが押し出される、いわゆるDownslope Conversionが確認されたほか、音波が水平海陸境界(海岸線)に沿って伝播するKelvin波的な境界波の生成も観察された。地震動は地震発生から数分間で十分遠方に広がってしまうのに対し、海中音波は海底と海面とで多重反射を長時間にわたって繰り返すため、10分以上にわたって震源近傍の海中に滞留することが確認できた。地震動の伝播速度は津波の10倍以上と速く、海底圧力計記録における二つの分離は容易である。しかし、海中音波は震源から100kmを超える範囲で津波に重畳して観測されるため、津波波形と海中音波の両方の評価が必要になる。

謝辞

本研究は文部科学省委託研究「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究プロジェクト 連動性を考慮した強震動・津波予測及び地震津波被害予測研究」の一環として行われた。本研究の数値シミュレーションには東京大学情報基盤センター HA8000 および（独）海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用しました。

キーワード: 地震動, 津波, 海中音波, 大規模シミュレーション, 並列計算, 差分法

Keywords: seismic wave, tsunamis, ocean acoustic waves, large scale computation, parallel computation, finite difference method