

地震動・津波の動的統合連成シミュレーション法の構築

#前田拓人・古村孝志

(東京大学 大学院情報学環総合防災情報研究センター／地震研究所)

E-mail: maeda @ eri.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

大地震発生時には、1 Hz 以上の高周波地震波から周期数百秒の長周期表面波や津波まで、極めて広い帯域の波動現象が発生する。2004 年スマトラ沖地震に伴うインド洋津波以降、津波の早期警報システムの整備が進められ、日本でも海底津波計による水圧カデータがリアルタイムで取得されるようになってきた。こうした津波計記録には、地震波の到来後に海水中を伝わる音波とその水中多重反射波、そして津波による圧力変動と地殻変動に伴う静的な圧力変化まで、長時間にわたって広帯域な地震随伴現象が含まれている。このような複雑な波動現象の解明を目指し、本研究では、重力平衡状態にある弾性体と海水モデルでの弾性波伝播問題を解くことで、地震発生から津波伝播までを統一的に再現できる数値計算モデルを構築した。

2. 地震動・海中音波・津波の動的連成シミュレーション

本シミュレーションでは、弾性体の上に海洋層がある媒質における弾性波動伝播の問題を、重力および静水圧平衡を仮定した運動方程式の差分法計算により評価する。海洋層は、 $V_s=0$ の弾性体としてモデルに導入する。ここで、モデルの各点における静止状態における法線応力を、重力と平衡する等方的な圧力項と、地震動や音波に伴う動的な項に分解して考える。こうすると弾性体の運動方程式の鉛直成分に現れる重力項が圧力項と平衡し、一様に実体力がかかり続ける重力場中においても、運動方程式を安定に解くことができる。また、静水圧平衡時に海面に現れる振幅変位を運動方程式に陽に取り入れることで、海面変位勾配に対して重力の復元力が働き、津波の伝播が評価できるようになる。このとき、運動方程式には、海表面における変位の水平勾配と重力加速度からなる項が付加されることが示される。ただし、本モデルでは Navier-Stokes 方程式に見られる非線形の移流項は考慮しない。一般に沖合における津波は線形近似がよく成立するとされるが、津波振幅が大きくなり非線形性が高くなる海岸線付近の験潮記録と本研究の結果の比較には注意を要する。

海底面は海水と弾性体の境界により表され、この境界面に平行な変位成分は境界面の上下で不連続となりうる。そこで、海底及び海面には岡本・竹中 (2005) が提案する境界条件を導入した。これは、境界面付近で差分計算の次数を下げ固液境界面での不連続を維持するものである。こうして、固体／液体境界での地震波伝播や断層運動に伴う海底や海面、及び地表面における永久変位を正しく評価することができる。また、津波は波長が長く、地震動計算で広く用いられている吸収境界条件 (Cerjan et al., 1985) ではモデル境界からの人工反射波を十分に消去することができない。そこで、Perfectly Matching layer 境界条件 (e.g., Moczo, et al., 2007) を、本研究の重力場中の運動方程式でも成立するように修正して利用するなどの計算上の工夫を行った。

3. 連成シミュレーションと音波・津波振幅の検討

2次元空間において、動的連成シミュレーションを実施した。5 km 厚の海洋層から 10 km の深さにダブルカップル型の点震源を設定し、空間および時間を 0.1 km および 0.005 秒の刻みで離散化して差分法計算を行った。計算から求められた海表面の変位を見ると、海中を伝播した音波とその多重反射、および近地項によってもたらされる変位が現れた (図 1a,b)。海底における変位は、半無限媒質における断層運動に伴う永久変位の解析解 (e.g., Okada, 1985) と良い一致を示すが、海面の変位はそれよりもやや空間的に鈍った形状をしている。海面における変位は、重力場を考慮しない運動方程式ではそのまま永久変位として残る。しかし、重力項を考慮した本計算では、時間の経過と共に、海洋層に現れた永久変位成分が重力によって水平方向に移動を始

め、分散性をもつ津波として伝播する様子も確認できた（図 1）。一方、海底における固体部分の永久変位は、重力の影響をほとんど受けない。この津波波形は、本計算から求められた海底地殻変動を初期海面変位として Navier-Stokes 方程式を用いて計算した分散性津波（Saito and Furumura, 2009）との良い一致を確認した（図 2）。

本研究により、従来の津波計算のように海面変動を初期値として与えることなく、地震地殻変動により海面に津波が生成し、伝播する過程を直接再現することができる。たとえば、ゆっくり地震など、断層破壊速度の遅い地震に伴う津波の生成についても評価が可能となることが期待される。

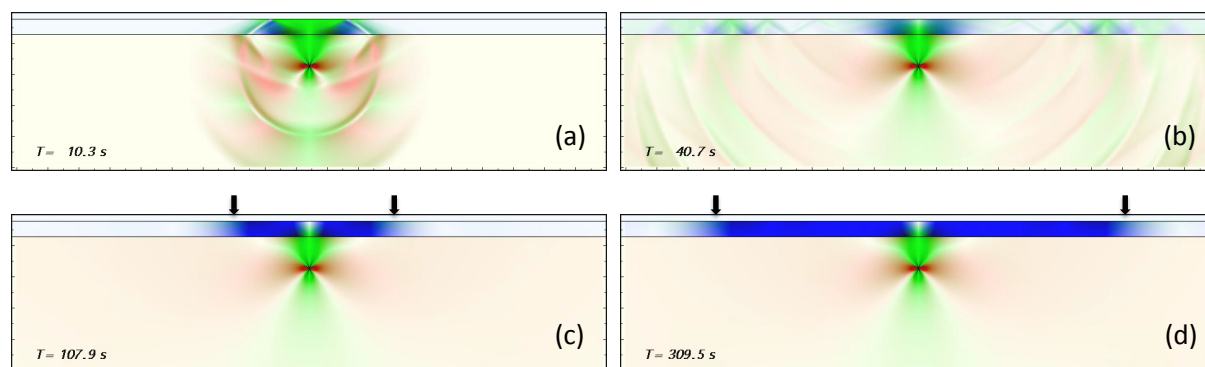


図 1. 動的統合連成シミュレーションによる地震動、津波のスナップショット。(a)-(d)の図中に示した各時間における上下動変位振幅を緑色で、陸および海域の水平動変位振幅を赤と青でそれぞれ示す。(c), (d)においては津波波群の先端を矢印で示した。

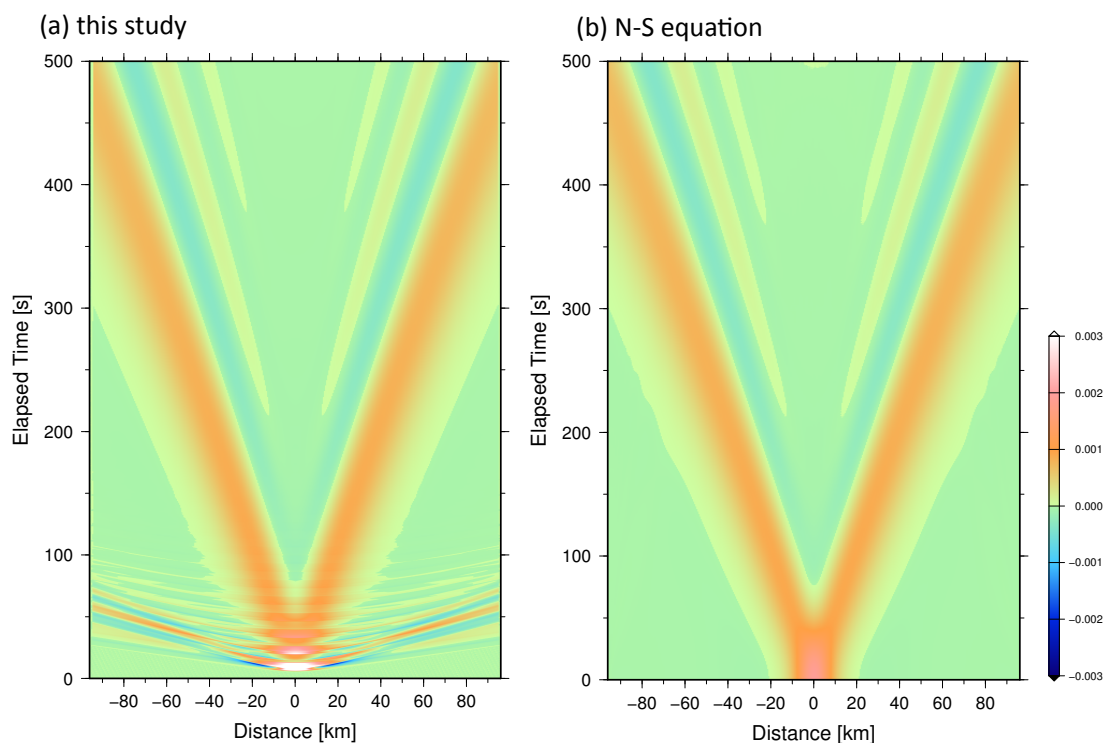


図 2. (a)本動的統合連成シミュレーションにより得られた海表面変位の時間および空間分布。(b) 重力を考慮しないシミュレーションにおける海表面の永久変位を初期条件とした Navier-Stokes 方程式に基づく津波変位の時空間分布。