

高詳細な地殻変動シミュレーションを用いた津波波高推定手法の基礎的検討

東京大学 学生会員 ○縣 亮一郎
 東京大学 正会員 市村 強
 京都大学 非会員 平原 和朗
 海洋研究開発機構 非会員 兵藤 守
 海洋研究開発機構 非会員 中野 優
 海洋研究開発機構 非会員 堀 高峰
 東京大学 正会員 堀 宗朗

1. はじめに

津波防災上重要な問題のひとつとして、海溝型巨大地震により引き起こされる津波の想定高さの適切な設定がある。津波高さ想定には、震源断層に対する海底面の上下変動の解析（以下地殻変動解析）を行い、次に与えられた震源断層に対する津波の順解析を行う、という手順が用いられる（たとえば[1]）。地殻変動解析には、水平成層の地殻構造を仮定するなどした解析解ベースの手法が広く使われている。一方、東北地方太平洋沖地震のように、大きな津波を引き起こす地震は、海溝軸に達する大きな断層変位を持つ可能性が指摘されている。そのため、有限要素法のような数値解析手法を用いて、沈み込み帯の三次元構造を詳細に再現した地殻変動解析を導入し、その津波解析の結果を検討する必要がある。これまで、やや大きめの分解能（数 km 程度）の有限要素モデルを用いた地殻変動解析と津波解析を組み合わせた例がある[2]。一方で、沈み込み帯周辺の地殻構造は分解能 1km のデータが入手可能であるが、このデータをそのままの分解能で用いたモデルの生成、およびそれを用いた地殻変動解析は、津波解析に適用するには計算負荷が大きすぎると考えられてきた。そこで筆者らは、ハイパフォーマンスコンピューティングの技術に基づき、沈み込み帯を 1km 分解能で詳細に再現した有限要素モデル（高詳細モデル）を用いた地殻変動解析手法の開発を行ってきた[3] [4]。本研究では、津波波高推定を行うための基礎的検討について報告する。その際、海溝軸に達する断層面と、斜面自体の水平方向の並進を考慮して、海底の上下変動を計算する。

2. 手法

本研究では数日以内の時間スケールを対象とするため、地殻変動を静的な弾性問題とみなす。有限要素法による定式化を行い、この弾性問題を高詳細なモデルにより解く場合、対象問題は 10^8 自由度の線形方程式の求解に帰着される。共役勾配法とマルチグリッド法を組み合わせた高速解法により求解を行う。食い違い断層は、節点分割法により入力する。東北地方太平洋沖地震震源域を含む 4 層地殻構造データから高詳細モデルを生成し、与えられた震源断層に対する弾性応答を計算する。震源断層は、Suzuki et al.[5]を元にしたものを用いる。メッシュ生成には、入力データである成層構造の地殻データ（数値標高データと物性値）に対する背景構造格子を利用した、Ichimura et al.[4]の手法を用いる。これにより地殻の複雑な形状や物性の不均質性を考慮した高詳細な地殻構造モデルを堅牢かつ高速に自動生成する。モデル化の対象範囲は $0 \leq x \leq 784\text{km}$ （東西）、 $0 \leq y \leq 976\text{km}$ （南北）、 $-400 \leq z \leq 0\text{km}$ （鉛直）とし、結果的にモデルの自由度は 126,855,927 となった。なお、元々の地殻構造データでは断層面が海溝軸に達しないため、海溝軸とプレート上面を補間し、断層面が海溝軸に達するモデルを生成した。比較対象として海底面・地殻形状も物性の不均質性も考慮しない「単純化モデル」を生成する。入力した震源断層とモデル化範囲の位置関係、および二種類のモデルの概観を図 1 に示す。これらのモデルを用いて地殻変動解析を行い、海底の上下変動を計算することで津波波源の推定を行う。上下変動計算では、鉛直変位に加え、斜面自体が水平方向に並進することによる上下変動も考慮している（図 2）。

3. 結果

図 2 に海底面の上下変動の、高詳細モデルでの計算結果、および（単純化モデル-高詳細モデル）の値を示

キーワード 高詳細な地殻構造モデル, 津波解析, 有限要素法, 地殻変動解析

連絡先 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1 地震研究所 1 号館 615 号室 TEL 03-5841-1774

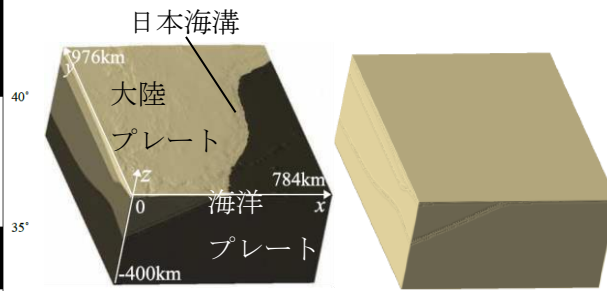
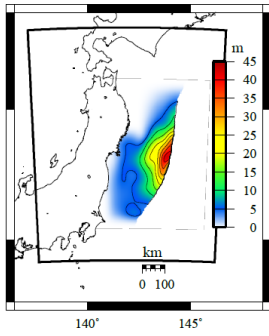


図1 Suzuki et al. [4] をもとにした入力震源断層とモデル化範囲(黒線)の関係(左). 黒線範囲に生成された高詳細モデル(中)と単純化モデル(右). 高詳細モデルでは,断層面(大陸プレートと海洋プレートの境界)が日本海溝に接続していることがわかる.

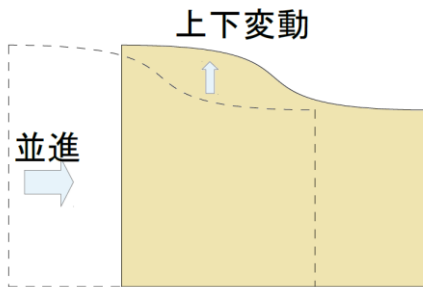


図2 高詳細モデルのように地表面形状がモデルに組み込まれている場合,斜面自体が並進することでも上下変動が生じる.

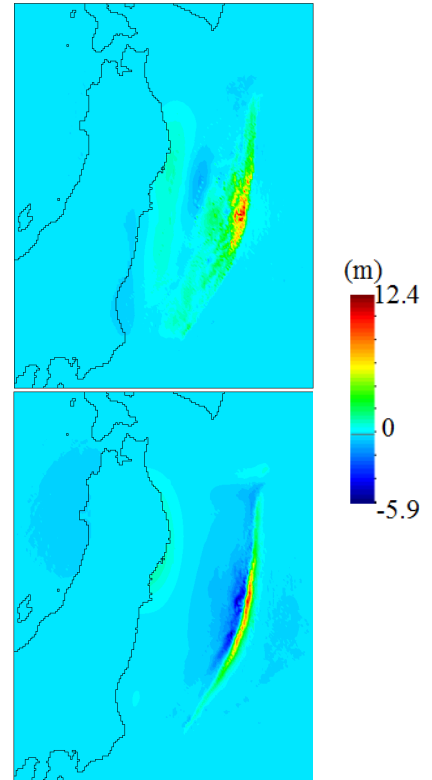


図3 高詳細モデルでの上下変動(上)と,(単純-高詳細)の値(下). 変動の可視化および検討中の津波解析は深さ(黒コンター)50m以上のみ対象としている.

す. 単純化モデルでの変動量は最大で高詳細モデルより 11m 程度大きくなっている. 高詳細モデルにおいて, 海溝軸に達する断層変位を含む沈み込み帯の三次元形状を考慮した影響と考えられる.

4. おわりに

従来法である単純化された地殻モデルを用いた結果との比較を通して, 津波波高想定に地殻構造の高詳細な有限要素モデルを導入することで, 津波解析の入力となる海底上下変動の解析結果が大きく変わりうることが示された. なお, 現在非線形浅水長波方程式による津波解析コードにより試験的に解析を行っている限りでは, 高詳細モデルと単純化モデルにおける沖合での波高が最大で数割程度変化する可能性が示唆されてきており, 発表の際にはこちらも報告する予定である.

参考文献

[1] 内閣府: 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告)津波断層モデル編-津波断層モデルと津波高・浸水域等について-, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829_2nd_report01.pdf, 2012. (2014年8月27日閲覧)

[2] Stephan T. Grilli, Jeffrey C. Harris, Tayebah S. Tajalli Bakhsh, Timothy L. Masterlark, Christodoulos Kyriakopoulos, James T. Kirby, and Fengyan Shi. Numerical Simulation of the 2011 Tohoku Tsunami Based on a New Transient FEM Co-seismic Source: Comparison to Far- and Near-Field Observations. *Pure and Applied Geophysics*, 170:1333-1359, 2012.

[3] 縣亮一郎, 市村強, 兵藤守, 堀高峰, 平原和朗, 堀宗朗: 震源断層の想定高度化に関する基礎研究-高詳細な三次元地殻構造モデルを用いた地殻変形解析手法の開発-, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), 69(4): I 767-I 776, 2012.

[4] T. Ichimura, R. Agata, T. Hori, K. Hirahara, and M. Hori. Fast numerical simulation of crustal deformation using a three-dimensional high-fidelity model. *Geophysical Journal International*, 195(3):1730-1744, 2013.

[5] W. Suzuki, S. Aoi, H. Sekiguchi, T. Kunugi, Rupture process of the 2011 Tohoku-Oki megathrust earthquake (M9.0) inverted from strong-motion data. *Geophysical Research*