

津波波源推定高度化を目指した 高詳細地殻変動解析に関する基礎的研究

縣 亮一郎¹・市村 強²・平原 和朗³・兵藤 守⁴・
中野 優⁵・堀 高峰⁶・堀 宗朗⁷

¹学生会員 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)・日本学術振興会特別研究員 DC

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

²正会員 東京大学地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

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

³非会員 京都大学大学院理学研究科 (〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町)

E-mail: hirahara@kugi.kyoto-u.ac.jp

⁴非会員 海洋研究開発機構 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25)

E-mail: hyodo@jamstec.go.jp

⁵非会員 海洋研究開発機構 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25)

E-mail: hyodo@jamstec.go.jp

⁶非会員 海洋研究開発機構 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25)

E-mail: horit@jamstec.go.jp

⁷正会員 東京大学地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

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

与えられた震源断層に対する地殻変動解析の手法の高度化が、津波解析の波源推定に与える影響を検討した。地殻変動解析の高度化のために、詳細な地殻データを元にした高分解能な地殻構造の有限要素モデル(高詳細モデル)による計算手法を用いた。南海地方を対象とした適用例により、高詳細モデルが考慮できる2つの効果、すなわち断層すべりがトラフ軸を抜ける効果と、地殻構造の地形・物性の考慮が、津波解析の波源だけでなく、都市部の隆起沈降量にも変化を及ぼす場合があることが示された。これより、津波高さ想定を行う際、高詳細モデルを用いることで地殻変動解析を高度化することの重要性が示唆された。

Key Words: *Tsunami source estimation, crustal deformation analysis, fault slip reaching the trench axis, high-fidelity model, finite element analysis*

1. はじめに

海溝型地震によって引き起こされる津波の高さを想定することは防災上重要である。津波高さの想定のためには、通常

1. 適切な震源断層を設定
2. 震源断層に対する地殻変動の解析
3. 地殻変動に対する津波の解析

の3ステップが必要となる。1の震源断層については、過去の統計や経験から、複数ケースが想定され、与えられることが多い¹⁾。3の津波解析については、流体の支配方程式を非線形長波論などを用いて近似し、それを差分法などを用いて数値的に解くことで行われる¹⁾。その他、津波が波源から沿岸に到達するまでの部分を二次元近似により解析し、都市部での遡上など詳細な計算が必要となる部分は三次元で解析する手法²⁾など、高精度化のための研究も進められている。一方2の地殻変動計算は、地殻を半無限弾性体など単純な形状に近似することにより解析的に計算される。この手法で

は地殻構造の三次元不均質性を考慮できず、それが想定に影響する可能性がある。そのため、与えられた震源断層に対する想定津波高さの計算には、津波解析の高度化に加え、地殻変動解析の高度化を検討することも重要と考えられる。

有限要素法などの数値解析手法を用いることにより、地殻構造の三次元不均質性を考慮した地殻変動解析を行うことが可能となる。Grilli *et al.*³⁾は、有限要素法による地殻変動解析と津波解析と組み合わせた研究を行った。だが、沈み込み帯周辺の地殻構造の高分解能データが入手可能であるのに対し、これらの研究で用いられる有限要素モデルはやや低めの分解能(数km程度)となっている。また、Fujiwara *et al.*⁴⁾は東北地方太平洋沖地震前後の日本海溝周辺の水深測量より、地震時すべりが海溝軸に達していることを示唆した。海溝軸(トラフ軸)に達するすべりの考慮は、海底面上昇の推定に大きく影響すると考えられるが、この効果を考慮している研究例はない。これらの理由は、沈み込み帯周辺を高分解能なモデル化自体が簡単でない上、高分解能

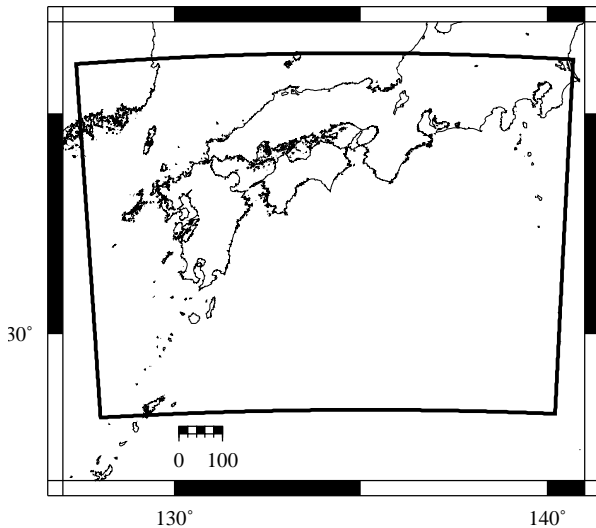


図-1 モデル化対象領域．後に示す断層すべりが十分に含まれる領域を確保している．

表-1 西南日本モデルを構成する5層の名称と物性値．最深部が浅い順に並べた． V_p : P波速度 (m/s), V_s : S波速度 (m/s), ρ : 密度 (kg/m^3)．

	V_p	V_s	ρ
Sedimentary layer	3500	2058	2318
Continental crust	5664	3300	2670
Oceanic upper crust	5100	3000	2550
Oceanic lower crust	6700	3941	2884
Mantle	6686	3818	2600

なモデルを用いた解析の計算負荷も大きくなるからだと考えられる．

筆者らのグループでは、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、懸ら⁵⁾、Ichimura *et al.*⁶⁾などにおいて、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 (HFM: High-fidelity model) を用いた地殻変動解析手法の開発を行ってきた．これらの手法は元々地殻変動データの逆解析への適用などを想定して開発されてきた．本研究では、これらの手法を用いて波源推定の高度化を試みる．具体的には、南海トラフを含む地域に生成したHFMを用い、地殻変動解析のツールを高度化することが、津波解析の初期条件に与える影響を考察する．

2. 南海モデル生成・解析手法

(1) 有限要素法定式化

数値解析手法として、地殻構造のような形状の複雑な連続体の解析に適した有限要素法を用いる．津波を引き起こす地殻変動は地震発生から数分程度に起こる

現象であり、食い違い断層に対する線形の弾性変形としてモデル化できる．境界条件を考慮して整理すると、問題は以下の一次連立方程式に帰着する

$$Ku = f, \quad (1)$$

ただし K , u , f はそれぞれ全体剛性マトリクス、変位ベクトル、外力ベクトルである．食い違い断層は、節点分割法⁷⁾によりモデル化する．節点分割法では断層面上の節点を仮想的に上下に分割し、節点の上下に逆方向の仮想変位に相当する節点荷重をそれぞれ与えることにより、食い違い断層を簡便に表現する．モデルの側面と底面にはDirichlet条件を与える．具体的には、面上の節点の法線方向の動きを固定し、それ以外の方向には拘束を与えない⁸⁾．

(2) 南海地方HFMの生成

有限要素モデルの生成は、懸ら⁵⁾、Ichimura *et al.*⁶⁾の手法をベースとして行う．彼らの手法は、複雑な地表・境界面形状を持った成層構造の入力データ (数値標高モデルデータと物性値) に対し、バックグラウンド構造格子を用いて、四面体要素とボクセル要素からなるハイブリッド有限要素モデルを生成するものであった．この手法では四面体・ボクセル要素ともに一次要素であったが、本研究ではボクセル要素を更に5つの四面体要素に分割した．さらに四面体要素をすべて二次要素とすることにより、解析精度の向上を見込んでいる．

対象とする解析領域を、図1に示す．南海トラフ地震の発生が想定される領域を含む、 $0\text{km} \leq x \leq 1184\text{km}$, $0\text{km} \leq y \leq 880\text{km}$, $0\text{km} \leq z \leq 400\text{km}$ の領域である．モデル生成に用いる入力標高データは、Citak *et al.*⁹⁾によるものであり、5層構造からなっている．各層の物性値については、表1に示した．地殻とマンツルの物性値はSato *et al.*¹⁰⁾の値を用い、堆積層と海洋地殻の値はNakanishi *et al.*^{11),12)}を参考に設定した．

Citak *et al.*⁹⁾のデータにおいては、断層面となるフィリピン海プレート上面の標高データが南海トラフ軸と繋がっていないため、トラフ軸に達する断層すべりを入力することができない．そこで、フィリピン海プレートのデータとトラフ軸の間を an adjustable-tension continuous curvature surface gridding algorithm¹³⁾により補間することで、新たな標高データを生成した．この新しい標高データから、地表面データと同等の1km分解能で生成した南海モデルを、本研究でのHFMとする．また比較対象として、XXのデータを加工せずにそのまま用いたモデル (OLDHFM) と、地表面を平均化し、物性を均質にすることで、半無限弾性体を模したモデル (Simplified model: SM) を生成した．HFM, OLDHFM, SMのモデル図を図2に示す．モデルの底面と側面に適用されたDirichlet条件は、半無限境界の近似であるため、

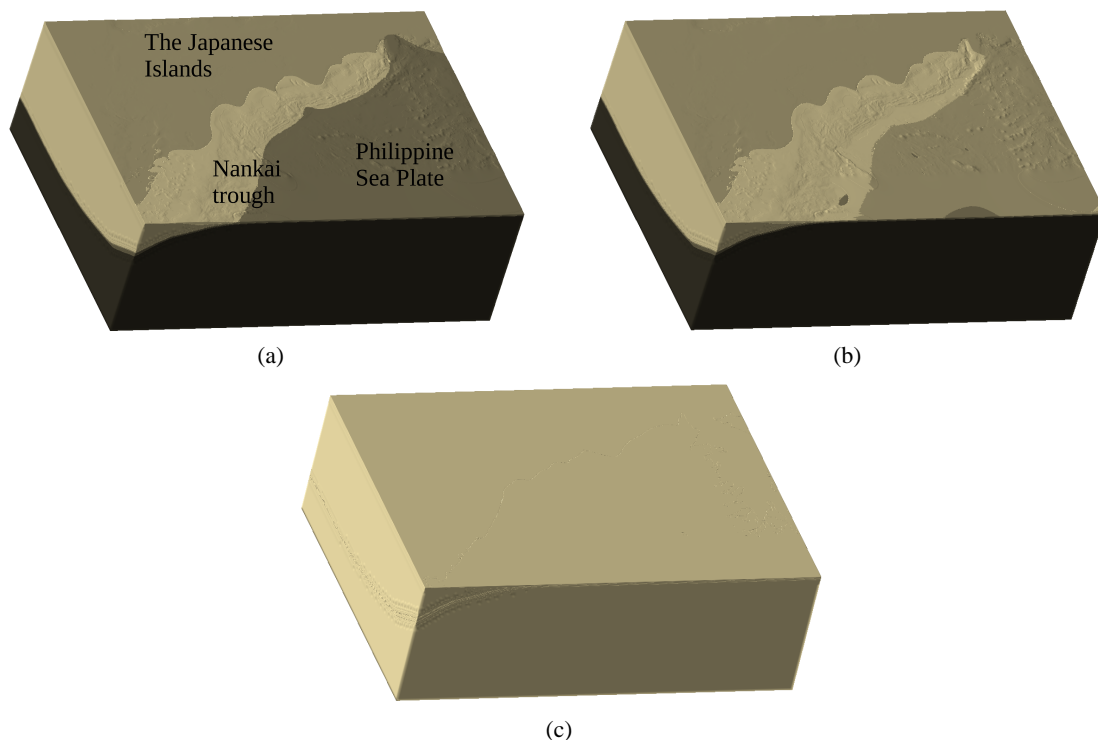


図-2 (a)HFM, (b)OLDHFM, (c)SM のモデル全体図.

近似誤差が無視できるまで境界を広げる必要がある．その結果，モデル領域を x の負方向に 448km，正方向に 960km， y の負方向に 192km，正方向に 448km 伸長することとなった．最終的な HFM の自由度は 2,107,672,545，四面体二次要素数は 517,919,470 となった．

(3) 解析手法

高詳細モデルは自由度が大きくなるため，連立方程式 $Ku = f$ の求解にかかると計算負荷が大きくなり，これを克服するための手法が必要となる．まず計算資源の制約上， K マトリクスをそのまま計算メモリ上に記憶させることは難しい．そこで K マトリクスが疎行列であることを利用して使用メモリ量を抑える Element-by-Element (EBE) 法¹⁴⁾ を，共役勾配 (CG) 法¹⁵⁾ と組み合わせる．これにより必要計算メモリ量は大幅に軽減される．必要な計算量を減らすためには，CG 法に対して適切な前処理を行う必要がある．可変前処理と，要素の次数が異なるモデルを利用したマルチグリッド法が組み合わせられた前処理を組み合わせる¹⁶⁾．スーパーコンピュータ京などの大形計算機で高速に計算を行うため，Message Passing Interface (MPI) による分散メモリ並列と OpenMP による共有メモリ並列を組み合わせたハイブリッド並列化を行った．

3. 想定南海地震に対する地殻変動の計算

2章で生成した有限要素モデルに対し，想定南海地震の断層すべりを入力し，計算された地殻変動を比較する．これにより，地殻変動解析手法の高度化が津波解析の初期条件に与える影響を考察する．入力する想定南海地震としては，南海地方における地震サイクルシミュレーション¹⁷⁾により得られた地震パターンの内，トラフ軸まで断層すべりが達するものを選んだ．図3に断層すべり絶対値のコンター図を示す．すべりの方向は，一律で東 55 度南の方位とした．

断層がトラフ軸に達する影響と，地殻構造の物性・形状を考慮することに影響を切り分けるため，HFM，OLDHFM，SM の三つのモデルに対して同様の解析を行い，HFM と OLDHFM の結果と，OLDHFM と SM の結果をそれぞれ比較する．図4に各モデルでの鉛直方向の変位計算結果と，モデルごとの結果の差を示す．図4(d)において HFM と OLDHFM の差を，(e)において OLDHFM と SM の差を示している．

まず断層がトラフ軸に達する影響について考察する．(a)ではトラフ軸の陸側から軸自体まで変位が滑らかに分布しており，トラフ軸を境に，海側において不連続的に小さくなっている．一方(b)ではトラフ軸より海側の部分にも変位が生じている．その結果，トラフ軸沿いの海側約 450km，幅約 10km の部分において，1~6m

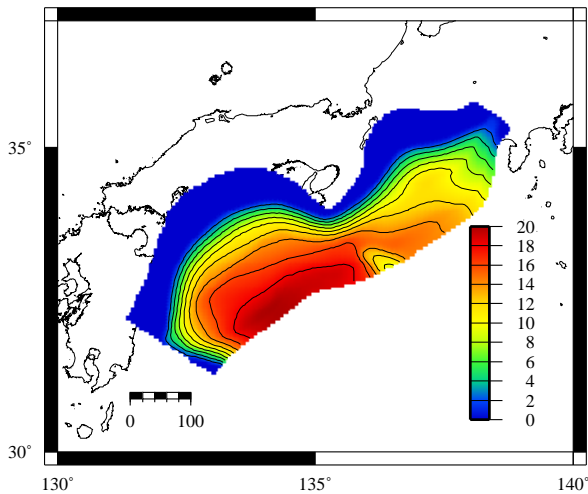


図-3 入力した想定南海地震の断層滑り (m) .

程度の鉛直変位差が生じた。(d)では、可視性向上のため3m以上の変位はすべて3mとして可視化している。一方、トラフ軸周辺以外の部分については、差は無視できる程度となっていることがわかる。これより、トラフ軸に達する断層すべりを含めたシミュレーションにより、変位場の不連続的な変化を考慮することができ、それがトラフ軸周辺の鉛直変位の解析結果に無視できない影響を及ぼす場合があることを確認した。

次に、地殻構造の物性・形状の考慮の影響について考察する。(b)(c)ともトラフ軸より海側の部分に変位が生じている点では同じだが、その変位には1~3.3m程度の差が生じている。また、(a)(b)の比較とは異なり、トラフ軸周辺以外においても最大0.4m程度の差が生じており、陸域に相当する領域では最大0.2m程度の差が見られた。このようなトラフ軸から離れた部分での変位差は、津波解析自体への影響は小さいと考えられる。しかし、都市部の隆起・沈降量の違いは津波遡上などの計算に影響すると考えられ、被害推定を行う際の重要な要素の一つになる。今回のケースでは差はそれほど大きくはなかったものの、地殻構造の物性・形状の考慮は、津波解析の波源推定だけでなく、都市部の隆起・沈降量を考慮した津波被害推定にも影響を与える可能性が示唆された。

最後に、(a)(b)(c)に示された測線上の、HFM、OLD-HFM、SMの鉛直変位を表した図5を示す。(d)に示されるトラフ軸での変位場の不連続的な変化による差と、(e)に示されるトラフ軸周辺と陸域双方での沈降隆起量の差の性質の違いがよりわかりやすく示されている。

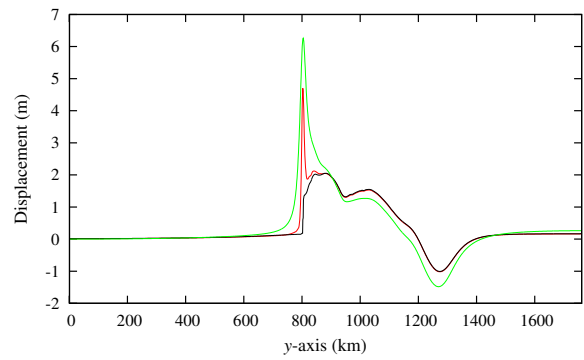


図-5 測線上におけるHFM(黒)、OLDHFM(赤)、SM(緑)の鉛直変位。(d)に示されるトラフ軸での変位場の不連続的な変化による差と、(e)に示されるトラフ軸周辺と陸域双方での沈降隆起量の差の性質の違いがよりわかりやすく示されている。

4. おわりに

本研究では、南海地方を対象に、与えられた震源断層に対する地殻変動解析の手法の高度化が、津波解析の初期条件に与える影響を検討した。地殻変動解析の高度化のために、詳細な地殻データを元にした高分解能な地殻構造の有限要素モデル(高詳細モデル)による計算手法を用いた。断層すべりがトラフ軸を抜けて地表面変位場が不連続的に変化する効果を考慮することで、トラフ軸付近の隆起沈降量が大きく変化する可能性があることを示した。続いて、地形・物性の考慮が、津波解析の波源だけでなく、都市部の隆起沈降量にも変化を及ぼすため、津波遡上の計算には双方の要因が影響する可能性があることを示唆した。これより、津波高さ想定を行う際、高詳細モデルを用いることで地殻変動解析を高度化することの重要性が示唆された。

今回のHFMは元データを加工することでトラフ軸に達する断層面を作成したため、今後は加工後のデータの妥当性の検討を進める必要があると考えられる。また、本論文においては地殻変動の推定を扱うのみにとどまったが、今後は地殻変動の計算結果をもとに津波解析を行うことを検討したいと考えている。

謝辞: 本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費(課題番号:26・8867)の助成を受けています。また、本論文の結果の一部は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです(課題番号:hp120278・hp120308)。ここに感謝の意を表します。

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/>

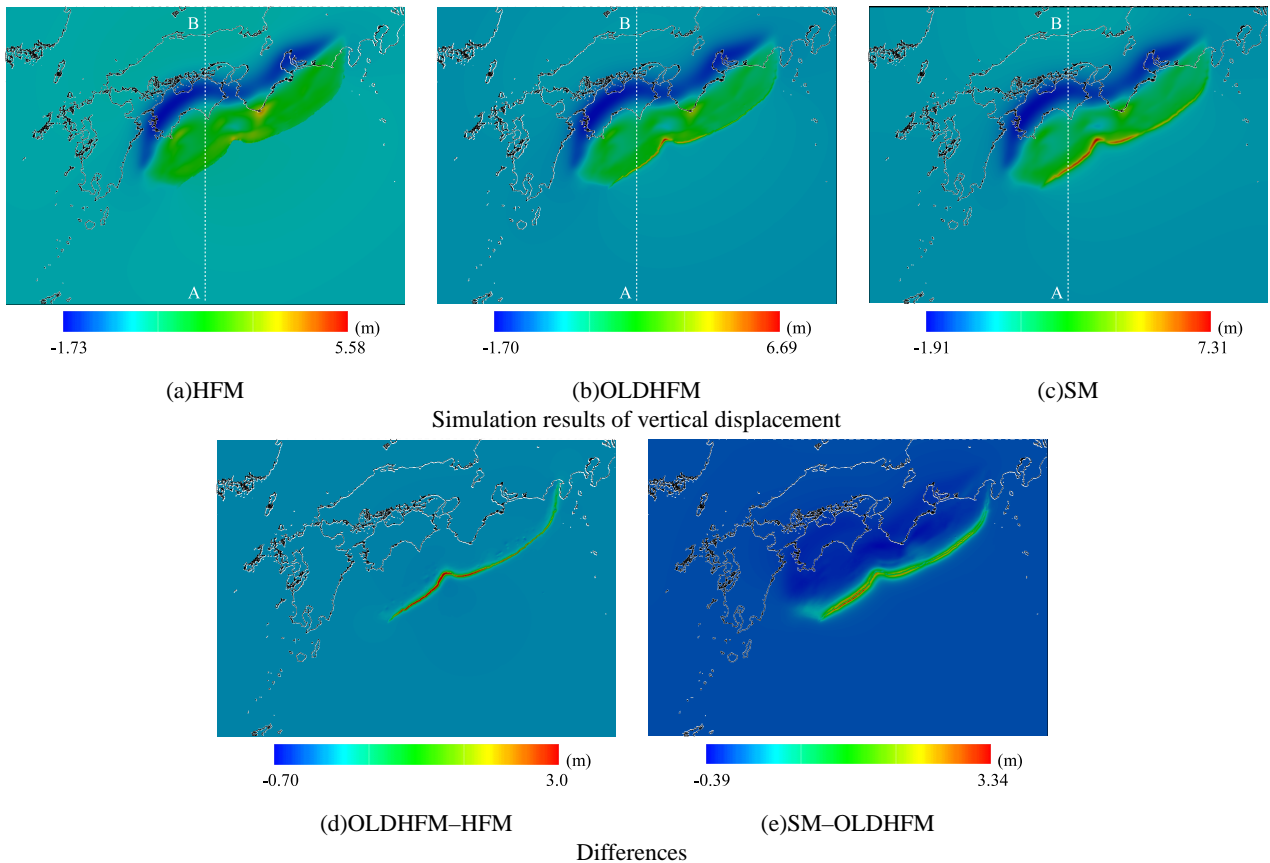


図-4 (a)(b)(c) 各モデルでの鉛直方向の変位計算結果．白破線は図 5 で用いる測線を表す．(d)HFM と OLDHFM の差と，(e)OLDHFM と SM の差．(d) では，可視性向上のため 3m 以上の変位はすべて 3m として可視化している．

- jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829_2nd_report01.pdf, 2012.
(2014年8月27日閲覧)
- 2) Suwa, T., Sugawara, D., and Imamura, F.: A Tsunami Simulator Integrating the Smoothed-Particle Hydrodynamics Method and the Nonlinear Shallow Water Wave Model. *1st International Conference of Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems*, Japan, 2014.
 - 3) Grilli, S. T., Harris, J. C., Tajalli Bakhsh, T. S., Masterlark, T. L., Kyriakopoulos, C., Kirby, J. T. and Shi, F.: 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*, Vol.170(6-8), pp.1333-1359, 2013.
 - 4) Fujiwara, T., Kodaira, S., No, T., Kaiho, Y., Takahashi, N., and Kaneda, Y.: The 2011 Tohoku-Oki earthquake: displacement reaching the trench axis. *Science (New York, N.Y.)*, Vol.334(6060), pp.1240, 2011.
 - 5) 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), Vol.69-4, p.767-776, 2013.
 - 6) Ichimura, T., Agata, R., Hori, T., Hirahara, K., and Hori, M.: Fast numerical simulation of crustal deformation using a three-dimensional high-fidelity model. *Geophysical Journal International*, Vol.195(3), 1730-1744, 2013.
 - 7) Melosh H. J. and Raefsky, A.: A simple and efficient method for introducing faults into finite element computations. *Bulletin of the Seismological Society of...*, Vol.71(5), pp.1391-1400, 1981.
 - 8) Aagaard, B. T., Knepley, M. G., and Williams, C. A.: A Domain Decomposition Approach to Implementing Fault Slip in Finite-Element Models of Quasi-static and Dynamic Crustal Deformation, *Journal of Geophysical Research*, Vol.118(6), 3059-3079, 2013.
 - 9) Citak, S. O., Nakamura, T., Nakanishi, A., Yamamoto, Y., Ohori, M., Baba, T., Kaneda, Y.: An Updated Model of Three-dimensional Seismic Structure in the Source Area of the Tokaitonankai-nankai Earthquake, *AOGS-AGU(WPGM) Joint Assembly*, Singapore, 2012.
 - 10) Sato, K., Minagawa, N., Hyodo, M., Baba, T., Hori, T. and Kaneda, Y.: Effect of elastic inhomogeneity on the surface displacements in the northeastern Japan: Based on three-dimensional numerical modeling, *Earth Planets Space*, Vol.59, pp.1083-1093, 2007.
 - 11) Nakanishi, A., Shiobara, H., Hino, R., Kodaira, S., Kanazawa, T., and Shimamura, H., Detailed subduction structure across the eastern Nankai Trough obtained from ocean bottom seismographic profiles, *J. Geophys. Res.*, Vol.103(B11), pp.27151-27168, 1998.
 - 12) Nakanishi, A., Takahashi, N., Park, J.-O., Miura, S., Kodaira, S., Kaneda, Y., Hirata, N., Iwasaki, T., and Nakamura, M.: Crustal structure across the coseismic rupture zone of the 1944 Tonankai earthquake, the central Nankai Trough seismogenic zone, *J. Geophys. Res.*, Vol.107(B1), doi:10.1029/2001JB000424, 2002.
 - 13) Smith, W. H. F. and Wessel, P.: Gridding with continuous

- curvature splines in tension. *Geophysics*, Vol.55(3), pp.293–305, 1990.
- 14) Hughes, T. J. R., Levit, I. and Winget, J.: An element-by-element solution algorithm for problems of structural and solid mechanics, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.36, pp.241-254, 1983.
 - 15) Barrett, R., Berry, M., Chan, T. F., Demmel, J., Donato, J., Dongarra, J., Eijkhout, V., Pozo, R., Romine, C., Van der Vorst, H.: Templates for the solution of linear systems: building blocks for iterative methods, 2nd edition, *SIAM: Philadelphia*, PA, 1994.
 - 16) Ichimura, T., Fujita, K., Tanaka, S., Hori, M., Lalith, M., Shizawa, Y., and Kobayashi, H.: Physics-based urban earthquake simulation enhanced by $10.7 \text{ blndof} \times 30 \text{ k}$ time-step unstructured fe non-linear seismic wave simulation. *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis* (accepted), 2014.
 - 17) Hyodo, M., and Hori, T.: Re-examination of possible great interplate earthquake scenarios in the Nankai Trough, southwest Japan, based on recent findings and numerical simulations, *Tectonophysics*, Vol.600, pp.175–186, 2013.

BASIC STUDY ON HIGH-FIDELITY CRUSTAL DEFORMATION ANALYSIS AIMING TO IMPROVE TSUNAMI SOURCE ESTIMATION

Ryoichiro AGATA, Tsuyoshi ICHIMURA, Kazuro HIRAHARA, Mamoru HYODO,
Masaru NAKANO, Takane HORI, and Muneo HORI

An improved method of crustal deformation analysis due to a given source fault may affect tsunami source estimation significantly. In this research, a computation method with a high-resolution finite element model of crustal structure (High-fidelity Model) based on detailed crustal data is used to improve crustal deformation analysis. The simulation results in the Nankai region of Japan showed that the vertical displacements around the trough axis and the city areas are affected by two important features of real fault slips which a high-fidelity model can consider: fault slip reaching the trough axis, and three-dimensional heterogeneous structure.