

物性不均質性を考慮した信頼性の高い数値計算による地震ハザード予測の研究

堀 高峰 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター

吉田 昌平^{*1}, 小林 広明^{*2}, 渡辺 哲史^{*2}, 笠松 健太郎^{*2}, 加藤 研一^{*2},
山本 優^{*3}, 西本 昌^{*3}, 日吉 善久^{*4}, 堀 高峰^{*4}

^{*1}大崎総合研究所、^{*2}小堀鐸二研究所、^{*3}大成建設 技術センター、^{*4}海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター

キーワード：長周期地震動，3次元有限要素法，地形効果，ベンチマークテスト，グリーン関数ライブラリ

1. はじめに

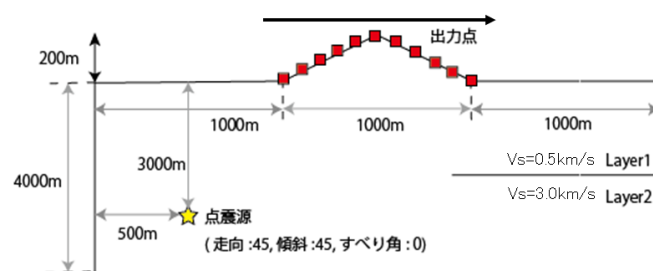
本課題では、大規模有限要素法に基づく地震動計算プログラム・E-wave FEM[1][2][3]の社会実装を目指し、民間企業と連携した長周期地震動の評価事例の蓄積を進めている。令和7年度に実施した評価事例として、地形効果に関する基礎的検討、現実的な地盤構造におけるベンチマークテスト、グリーン関数ライブラリと地震動評価、について紹介する。

2. E-wave FEMを用いた地形効果に関する基礎的検討

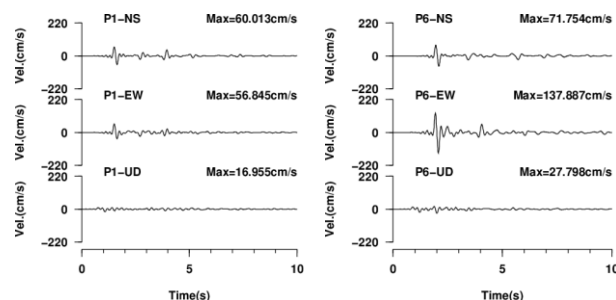
地盤の不整形性など複雑な地盤情報を反映した3次元地震動シミュレーションには有限差分法や有限要素法が用いられることが多い。日本では一般的に広域の地震動シミュレーションに有限差分法が使われることが多く、地表面を水平にして計算することが多い。しかし、実際の地表面形状は山地や海底のような起伏が存在し、より現実的な評価のためには地形を含んだ地震動シミュレーションの方が適切であると考えられるが、現状では地形が地震動に及ぼす影響（以下、地形効果）は十分に整理されておらず、地形効果の定量的な評価が今後必要となる。本検討では地形効果を定量的に把握することを目的として、手法の違い（有限差分法と有限要素法）が結果に与える影響の評価や単純な地形を有する地盤モデルを複数生成して地震動シミュレーションを実施し、その特徴を整理することを試

みた。単純な地形モデルの一例を図2-1に示す。このモデルの計算領域は3 km×3 km、格子間隔を5 mとし、1波長5格子の精度で20 Hzまで考慮できる設定にした。3次元有限要素法により地震動評価を実施するために、地盤構造モデルは四面体二次要素メッシュにより生成した。生成したメッシュを並列計算用に領域を分割するために、ES4GPU1ノードを用いた。有限要素法による地震動計算にはスーパーコンピュータ「富岳」を用いた。その他にも山の高さや山裾の幅を変えた複数のモデルに対して震源位置を変えた多数回の計算を実施し、波長と地形の関係など地形効果の影響を系統的に評価した。

図2-1に単純な地形モデルの山裾と山頂の5 Hz以下の速度波形の結果を合わせて示す。単純な山地形の場合、入射角度にも依るが山裾や傾斜部に比べて山頂の計算波の振幅が大きくなる傾向が確認できた。これらは過去の観測記録に基づく報告と整合的である。図2-2のEW成分速度のスナップショットを確認した結果、傾斜部で生じた地表面からの反射波と震源から生成された直達波が山頂付近で重なることで増幅することが確認できた。地形効果は高周波数帯域の地震動に影響するため、より高周波数側の地震動シミュレーションを実施する際に重要であることが示唆される。今後は地形の形状や山裾の幅や高さを変えた際の地形効果を整理し、観測記録との対応関係を確認する予定である。



(a) 単純モデル



(b) 5Hz以下の速度波形の比較（左：山裾、右：山頂）

図2-1 単純な地形モデルと計算結果の一例

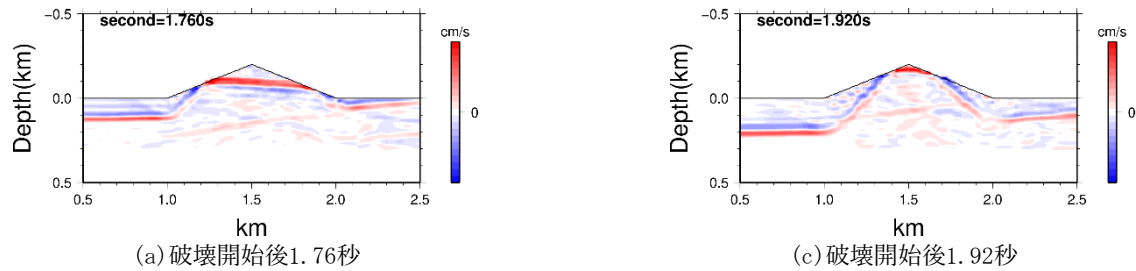


図2-2 図2-1モデルのEW成分の速度のスナップショットの一例

3. 現実的な地盤構造におけるベンチマークテスト

これまで、E-wave FEM と従来から実務に用いている有限差分法 (FDM) との Verification を進めてきた[4]。本研究では、地形を考慮に入れた現実的な地盤構造を対象とし、面震源を意図した多重点震源のベンチマークテストを実施した。

領域の水平方向のサイズは吸収領域を除いて図 3-1 に示す南北方向 190 km、東西方向 140 km とした。深さ方向は吸収領域を含み約 100 km をモデル下端とした。地盤モデルは全国 1 次地下構造モデル[5]を基にした。地盤モデルの最小の S 波速度は 350 m/s で、海水は考慮していない。震源は、中央防災会議[6]の東京湾北部地震の断層モデルを参考に設定した。具体的には、アスペリティ 1 のみを抜き出し、震源が位置する地盤の層を共通にするために、震源深さをフィリピン海プレート上面深度より 500 m 浅い位置とした。点震源の数は 1300 個である。対象周期帯は周期 2~10 秒とした。FEM については、メッシュの水平方向の最小サイズを 100 m とし、要素の自動生成を行った。総要素数は吸収領域を含めて約 28.9 億、自由度は約 117 億となった。計算長は 0.01 秒刻みで 200 秒間とした。FEM では非弾性減衰にレイリー減衰を用いており、ここでは 0.07~0.7 Hz で全国 1 次地下構造モデル[5]の Q_s に概ね近くなるように設定した。メッシュ生成には地球シミュレータの GPU ノードを、地震動計算にはスーパーコンピュータ「富岳」を用いた。

FDM については格子間隔の影響について検討するため、①水平 100 m、上下方向は 50 m (ただし、深さ 10 km 以深は 100 m) とした場合 (FDM100) と、②格子間隔をより細かくして水平 50 m、上下 20 m (ただし、深さ 10 km 以深は 50 m) とした場合 (FDM50) の 2 通りについて計算を行った。S 波速度 350 m/s、周期 2 秒の場合、1 波長あたりのグリッド数は 50 m の時 14、20 m の時 35 である。FDM100 の総格子点数は吸収領域も含めて約 55 億、自由度は約 164 億、FDM50 は同様に総格子点数約 470 億、自由度は約 1410 億である。計算長は共に 0.001 秒刻みで 200 秒とした。FDM では、非弾性減衰に Graves[7]に基づく周波数依存する減衰を用いており、ここでは 0.4 Hz で全国 1 次地下構造モデル[5]の Q_s に一致するよう設定した。地震動計算には地球シミュレータの VE ノードを用いた。

図 3-1 の測線 A について、FEM と FDM50 の速度波形の NS 成分の比較を図 3-2 に示す。波形は全観測点において 2 手法間でよく合っているが、実体波部分と見られ

る波形の最初の部分に比べ、表面波と見られる後続波の部分の差が相対的に大きい。

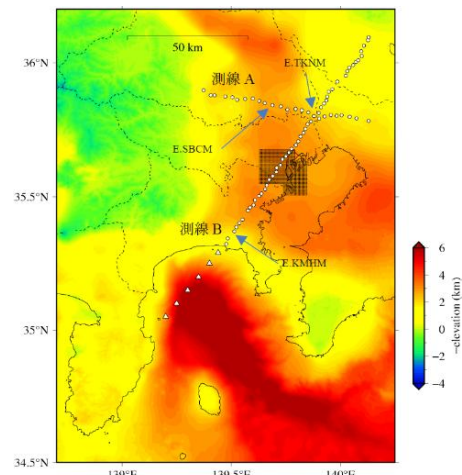


図 3-1 検討対象領域 (吸収領域は除く)

白○と△は比較に用いた観測点、黒点は点震源震央、背景色は S 波速度 3.2 km/s 層の上面標高を示す。

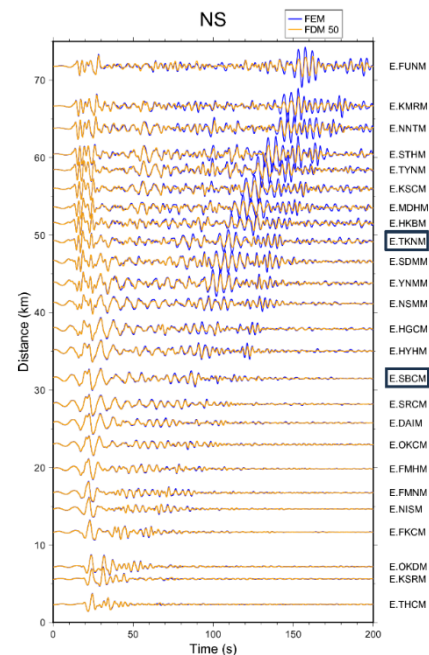


図 3-2 FEM (青) と FDM50 (橙) の計算速度波形比較 (測線 A, 各波形ペアで振幅を基準化)

図は割愛するが、各観測点のフーリエスペクトルから、FDM は FEM とよく対応するものの、0.3 Hz 以上な

どではFDM50はFDM100に比べてFEMとの合いが細部でよくなることを確認した。また、FEMとFDMのメッシュ／グリッドを比較し、グリッドが細かいFDM50はFEMとの差が小さいことを確認した。残存する2手法の波形の違いの要因は主に減衰の設定の違いが考えられる。

4. 3次元FEMによるグリーン関数ライブラリの構築と地震動評価

4.1 グリーン関数ライブラリの構築

大規模地震に対する防災・減災対策において、詳細な3次元地下構造モデルを用いた地震動予測は不可欠である。長周期地震動評価に良く用いられる有限要素法(FEM)による数値解析は、複雑な地盤構造や波動伝播現象を精度よく再現できる反面、膨大な計算コストを要する。また、広域かつ高解像度な解析を行うための大規模な要素分割にも、多大な計算資源を必要とする課題がある。

そこで本課題では、将来的に迅速かつ効率的な長周期地震動評価を実現することを目的として、相模トラフ沿いのプレート境界におけるグリーン関数ライブラリの構築を行った。解析には、3次元FEMコード「E-wave FEM」を用い、「地球シミュレータ」を用いて大規模な3次元要素分割を行い、そのモデルを用いてスーパーコンピュータ「富岳」による地震動伝播計算を実施した。主な解析諸元は表4-1の通り設定した。図4-1に解析領域を示す。

表4-1 解析諸元

解析領域	260.8km×200.0km×60.0km
地下構造モデル	浅部・深部統合モデル
プレート構造モデル	全国1次地下構造モデル
最小要素サイズ	200m
要素数	4.08億個
節点数	5.49億個
検討周期	3.0秒以上
時間刻み	0.1秒
継続時間	200秒(2000ステップ)

プレート境界に沿う想定地震発生エリアに対し、グリッド状に点震源を配置した。図4-1に点震源配置示す。各点震源に単位地震モーメント(1.0×10^{20} Nm)および単位震源時間関数(二等辺三角形, 継続時間2秒)を与え、地表面における地震動波形(グリーン関数)を算出した。出力点は陸域に約1km間隔で設定し約24,000地点とした。

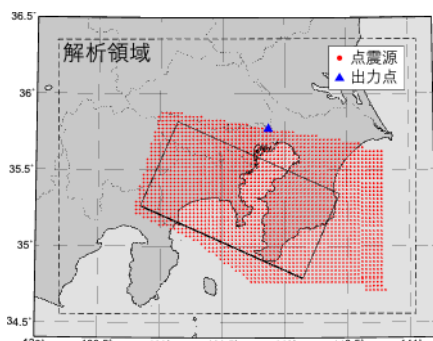


図4-1 解析領域と計算する点震源の配置

構築したライブラリの精度検証として、複数の点震源を空間的に配置し、適切な破壊遅延時間を考慮して重ね合わせることで、面的な広がりを持つ断層モデル(面震源)の地震動合成を試みた。比較のため、同条件で別途実施した多数点震源モデルによる直接的なFEM解析も行った。図4-2に計算した加速度波形を示す。本ライブラリを用いて合成された波形は、多数点震源を用いた一度の解析結果と良好に一致することを確認した。

本ライブラリを活用し、相模トラフ沿いのプレート境界地震に対して、大規模な3次元数値計算をその都度行うことなく、多様な震源シナリオに対する地震動を速やかに算出・評価するシステムを構築した。

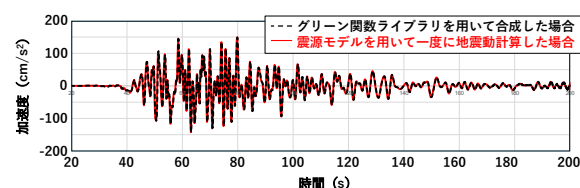


図4-2 グリーン関数ライブラリを用いた計算と通常の計算の結果比較

4.2 震源のばらつきを考慮したアンサンブル計算

構築したグリーン関数ライブラリを活用し、将来発生しうる地震の震源特性のばらつきが地震動予測に与える影響を定量化するため、アンサンブルシミュレーションを実施した。図4-1に黒線で示す巨視的面を設定し、表4-2に示す震源特性のばらつきを考慮した1,000個のアンサンブル震源モデルを作成して図中▲地点の地震動を合成した。

表4-2 震源特性の設定

震源特性	分布形状	平均値(中央値)	標準偏差(対数標準偏差)
アスぺリティ面積比	対数正規	(0.24)	(0.096)
アスぺリティ間の面積比	正規	0.50	0.30
すべり量比	正規	1.90	0.266
破壊伝播速度係数	対数正規	(0.72)	(0.1)
破壊開始点位置	正規	0.50	0.20
第1アスぺリティ位置	一樣	—	—
第2アスぺリティ位置	一樣	—	—

合成された1,000個の地震動の大きさのヒストグラムを図4-3に示す。単峰状の分布形状を示し、設定した震源特性に対して対数標準偏差で0.57程度のばらつきが生じる結果となった。本結果より、震源特性のばらつきが地震動評価に与える影響を、グリーン関数ライブラリを用いて効率的に評価可能であることが示された。

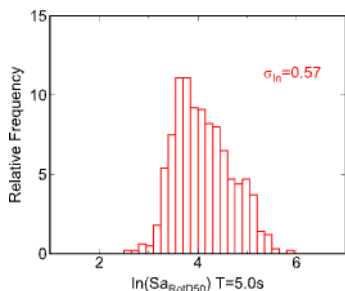


図 4-3 合成した地震動の大きさのヒストグラム

謝辞

本研究は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「富岳」による地震の大規模シミュレーションの基礎拡充と社会実装へ向けた展開（課題 ID：hp230203）の一環として実施され、本計算の一部は、スーパーコンピュータ「富岳」上で実施した。また、その計算には東京大学地震研究所が開発中のコード E-wave FEM を提供していただいた。

文献

- [1] Ichimura, T., Hori, M., Bielak, J., “ A hybrid multiresolution meshing technique for finite element three dimensional earthquake ground motion modelling in basins including topography ”, Geophysical Journal International, Volume 177, Issue 3, 1221-1232, (2009).
- [2] Ichimura, T., Fujita, K., Tanaka, S., Hori, M., Lalith, M., Shizawa, Y., & Kobayashi, H., “ Physicsbased urban earthquake simulation enhanced by 10.7 BlnDOF× 30 K time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation ”, SC’ 14, (2014).
- [3] Ichimura, T., Fujita, K., Quinay, P. E. B., Maddegadara, L., Hori, M., Tanaka, S. et al., “ Implicit nonlinear wave simulation with 1.08 T DOF and 0.270 T unstructured finite elements to enhance comprehensive earthquake simulation ”, SC’ 15, (2015).
- [4] 渡辺、小林、笠松、古家、加藤、縣、廣部、日吉、堀、” 富岳を用いた大規模地震動計算に向けた Verification: 長周期地震動のベンチマークテスト ”、第 16 回日本地震工学シンポジウム、Day2-C2-PB24、(2023).
- [5] Koketsu, K., Miyake, H., & Suzuki, H., “ Japan integrated velocity structure model version 1 ”, Proceedings of 15th world conference on earthquake engineering, (2012).
- [6] 中央防災会議、首都直下地震対策専門調査会（第 12 回）、(2004).
- [7] Graves, R. W., “ Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences ”, Bull. Seism. Soc. Am, 86, 4, 1091-1106, (1996).