

平野における高周波数帯域まで適用できる 強震動評価技術の開発

プロジェクト責任者

司 宏俊 株式会社構造計画研究所

著者

田島 礼子^{*1}、西條 裕介^{*1}、正月 俊行^{*1}、司 宏俊^{*1}、廣川 雄一^{*2}

*1 株式会社構造計画研究所

*2 独立行政法人海洋研究開発機構

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 23 年 4 月 1 日～平成 24 年 3 月 31 日

アブストラクト

地震災害の軽減のためには、ある特定の地震が発生した際の地震動をシミュレーションによって正確に予測し、それに基づいた対策を検討しておくことが有効と考えられる。近年では、地面をガタガタと揺する短周期の地震動から、高層建築物や巨大構造物に影響を与えるゆっくりした長周期の揺れ（長周期地震動）までの、広帯域にわたる地震動シミュレーションを行うことが求められている。広帯域での地震動シミュレーションを精度良く行うためには、精度の高い3次元の地下構造モデルと対象地震の震源断層モデルを用いて、理論的手法による計算を行うことが望ましい。しかしながら、長周期地震動が卓越する関東平野などの大規模平野を対象として、短周期を視野に入れた3次元の地震動シミュレーションを実施する場合には、通常のPCクラスタでは計算が困難となる。また、強震動被害に大きく寄与する短周期地震動（周波数1 Hz以上）は伝播経路中のスケールの小さな地震波速度のゆらぎや複雑な表層での散乱の影響を受け非常に複雑な伝わり方をすることが知られていることから、従来の層境界内を均質媒体とする3次元地下構造モデルでは観測されている短周期波形を説明することが難しいと考えられる。

平成21・22年度には、震源の物理や地震波動理論に基づいた3次元有限差分法の地震波伝播解析プログラムを計算能力の高い地球シミュレータに移植し、改良および最適化を行い、大規模問題の取り扱いを可能にした。さらに、地震が発生した場合に長周期地震動の卓越や大きな被害が予測される大阪平野および関東平野を対象に、想定地震および過去の被害地震の大規模シミュレーションを実施した。

本年度は、1 Hz以上の短周期地震動の計算精度の向上を目的に、関東地域で起こった中規模地震を対象に、3次元地下構造モデルの層境界内の物性値にゆらぎを与えたランダム媒質導入モデルでの計算（2 Hzまで）を行い、観測記録との比較によりモデルの適用性を確認した。また、前年度の計算で発生していた解の発散について対策を実施し、計算におけるノウハウを蓄積した。

キーワード： 波動伝播、差分法、関東平野、ランダム媒質、発散

1. はじめに

日本は4つのプレートがぶつかり合う地域に位置し地震が多く発生するため、古くから地震災害の脅威にさらされてきた。地震による被害を軽減するためには、あらかじめ起こりうる被害を予測しておき、予測結果に基づいた対策を講じておくことが重要である。近年では、短い周期の波によるガタガタした強い揺れ（短周期地震動）と、高層建築物や巨大構造物に影響を与える長い周期の波が伝わることによって生成されるゆっくりした揺れ（長周期地震動）の両者を考慮した地震動評価を行うことが求められている。実際に、2011年3月11日に起こった東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0）の際には、震源に近い宮城県北部で最大震度7、岩手県から千葉県にかけて震度6弱以上を観測するなど広範囲で強い揺れとなったほか、長周期地震動による揺れが首都圏や大阪府など震源から離れた地域にも大きな影響を与えた（気象庁, 2011¹⁾。南海トラフの巨大地震では首都圏での長周期地震動はプレート構造による伝播経路により、東北地方太平洋沖地震よりも大きくなることも指摘されている（例えば、古村・前田, 2012²⁾）。

理論的な波動伝播シミュレーションにおいては、より現実的な3次元地下構造モデルと対象地震の震源断層モデルを用いた地震動シミュレーションを精度良く行うことが望ましい。しかし、現状では長周期成分を3次元差分法などの理論的手法で計算し、約1 Hz以上の短周期成分については統計的グリーン関数法等により計算し、両者を合成するハイブリッド合成法が用いられている。これは、理論的手法で高周波数域まで計算しようとする透過振動数の関係から差分格子間隔を非常に細かく設定しなければならず、結果的に莫大な格子点数となり、PCクラスタなどで計算することが困難なためである。

また、強震被害に大きく寄与する短周期地震動（ $f \geq 1$ Hz）は、伝播経路中のスケールの小さな地震波速度のゆらぎ（短波長不均質構造）や複雑な表層での散乱の影響を受け非常に複雑な伝わり方をすることが知られており、これらの影響を考慮した差分法による地震動シミュレーションの研究も行なわれている（例えば、古村・齊藤, 2006³⁾; Kennett and Furumura, 2007⁴⁾; 武村・他, 2011⁵⁾）。これらの研究で採用されている地震波速度のゆらぎを3次元地下構造モデルに導入した計算を行うことは短周期地震動の計算精度の向上に繋がると考えられる。

平成21・22年度には、震源の物理や地震波動理論に基づいた3次元有限差分法の地震波伝播解析プログラムを計算能力の高い地球シミュレータに移植し、改良および最適化を行い、大規模問題の取り扱いを可能にした。さらに、地震が発生した場合に長周期地震動の卓越や大きな被害が予測される大阪平野および関東平野を対象に、上町断層での想定地震および過去の被害地震（1923年関東地震）のシミュレーションを実施した。関東地震については、地下構造の最小地震波速度を変えて、1 Hzおよび2 Hzまでの計算を実施し、観測記録が得られている長周期の観測記録（ $0.067 \leq f \leq 0.33$ Hz）との比較を行った。

本年度は、1 Hz以上の短周期地震動の計算精度の向上を目的に、観測記録が豊富に得られている関東地域で起こった中規模地震を対象に、前年度使用していた3次元地下構造モデルの層境界内の物性値にゆらぎを加えたランダム媒質を用いた計算（ $f \leq 2$ Hz）を行い、観測記録との比較により精度の確認を行った。また、前年度の1923年関東地震を対象とした検討では、計算において発散の問題が発生していたため、解決のための対策を実施した。

2. ランダム媒質を導入した中規模地震の計算

2.1 計算プログラム

波動伝播シミュレーションには、3次元有限差分法に基づく地震波伝播解析プログラムを使用する。本

プログラムは、平成 21 年度に地球シミュレータに移植し、平成 22 年度並列化およびベクトル化のチューニングを実施したものである。最終的なプログラム性能は 96 ノード (768 CPU) の場合において、平均ベクトル化率 99.190%、並列化率 99.898% となった。

2.2 計算条件

2.2.1 計算対象周波数

離散化した波動方程式を数値的に解く場合、十分な演算精度を安定して得るためには、計算対象の地震波の波長に比べて十分に小さな格子間隔を取る必要があり、空間 4 次精度の差分演算子を用いる場合は、1 波長あたり 6 格子程度が必要となる。本検討では、最小地震波速度 = 600 m/s に対し、格子間隔 = 50 m とすることで 2 Hz までを対象周波数とした。

2.2.2 対象地震

より高精度に短周期波形を計算するために、1 Hz 以上の地震動に影響する地下構造の物性値のゆらぎを考慮した計算を行った。図 1 に、計算領域における対象地震および対象観測点の位置を示す。対象地震は、豊富な観測記録が得られている関東平野で起こった中規模地震 (2008 年 8 月 8 日 12:57 の東京都多摩区直下の地震 : Mw 4.6, 震源深さ 38 km) とし、地震規模が小さいため、点震源を仮定した。地震動の評価地点は関東地域の K-NET, KiK-net 観測点とした。

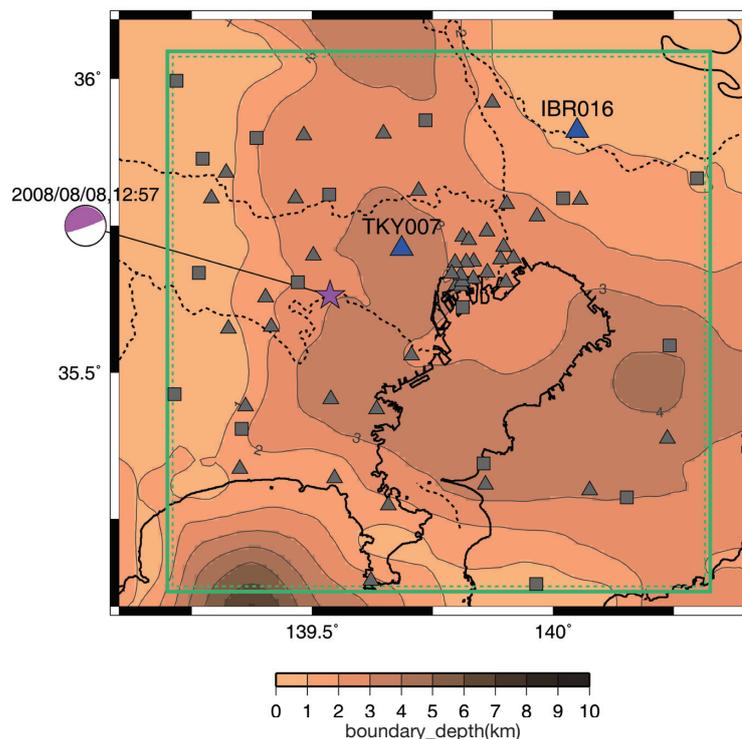


図 1 計算領域 (緑色枠) における対象地震 (星印) および観測点 (\triangle : K-NET, \square : KiK-net) の位置
※コンター図は地震基盤 ($V_s=3.2\text{km/s}$) の上面深度

2.2.3 計算モデル

シミュレーションで使用する地下構造モデルは、長周期地震動予測地図 2009 年試作版（地震調査研究推進本部，2009⁶⁾）において公開されている想定東海地震・東南海地震のための 3 次元地下構造モデルのうち、対象地震を取り囲む領域を抽出して使用した。計算領域の大きさは南北方向 102.4 km × 東西方向 102.4 km × 深さ方向 51.2 km で、格子間隔は 50 m、計算規模は約 43 億格子規模である。このモデルは層内が均質である従来の 3 次元地下構造モデルである（以後「従来モデル」と呼ぶ）。

本検討では、図 2 に示すように、従来モデルにランダム媒質（相関距離 $A_x, A_z = 0.3$ km、標準偏差 4% のフォン・カルマン型の速度揺らぎ分布）を掛け合わせることで、物性値のゆらぎを考慮したモデルを作成した。図 3 にランダム媒質を導入したモデルと従来モデルの地下構造の比較を示す。

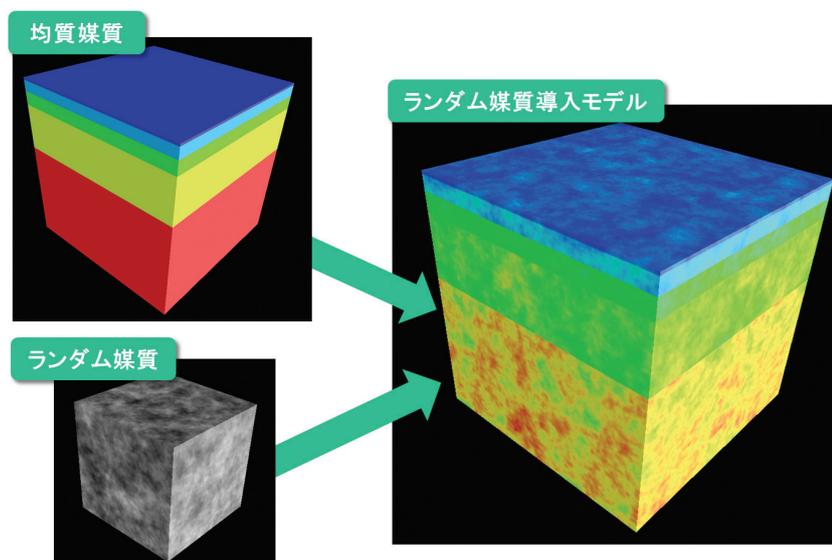


図 2 ランダム媒質導入モデルの作成イメージ

(a) ランダム媒質導入モデル

(b) 従来モデル

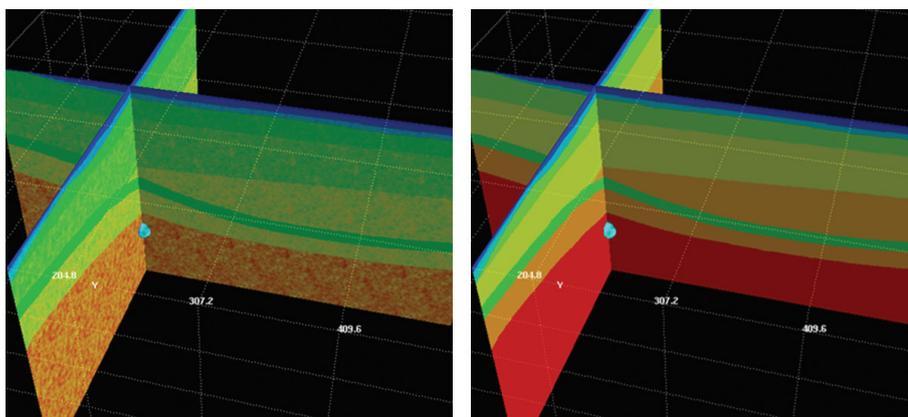


図 3 地下構造モデルの断面図（水色球：震源）

2.3 結果

図 4 に計算結果と観測記録の比較例を示す。ランダム性を考慮することで、地下構造モデル（媒質）の全体で地震波の散乱が起こり、観測記録に見られる初動および主要動の後に続く後続波の再現性が改善されることが分かった。図 5 に、波動伝播の様子のスナップショットを示す。この図を見ると、深さ 38 km の震源から放出された地震波が地表に到達し伝播していく様子が分かる。S 波による主要動が地表に到達する付近（15 秒前後）までは、従来モデルとランダム媒質導入モデルで伝播の様子に大きな違いは見られないが、20 数秒以降のスナップショットでは、ランダム媒質導入モデルの方が散乱により大きな振幅の揺れが広範囲で継続している様子が分かる。このようなランダム媒質導入モデルによる後続波の再現性の向上は、より長い継続時間の波形を生成する大きな地震のシミュレーションにおいて効果的であることが示唆される。今後、ランダム媒質の相関距離を地層のラミナ状に近づける、上部地殻・下部地殻・マントルでゆらぎの度合いを変化させる等の改良を行うことで、より現実的なシミュレーションが可能と考えられる。

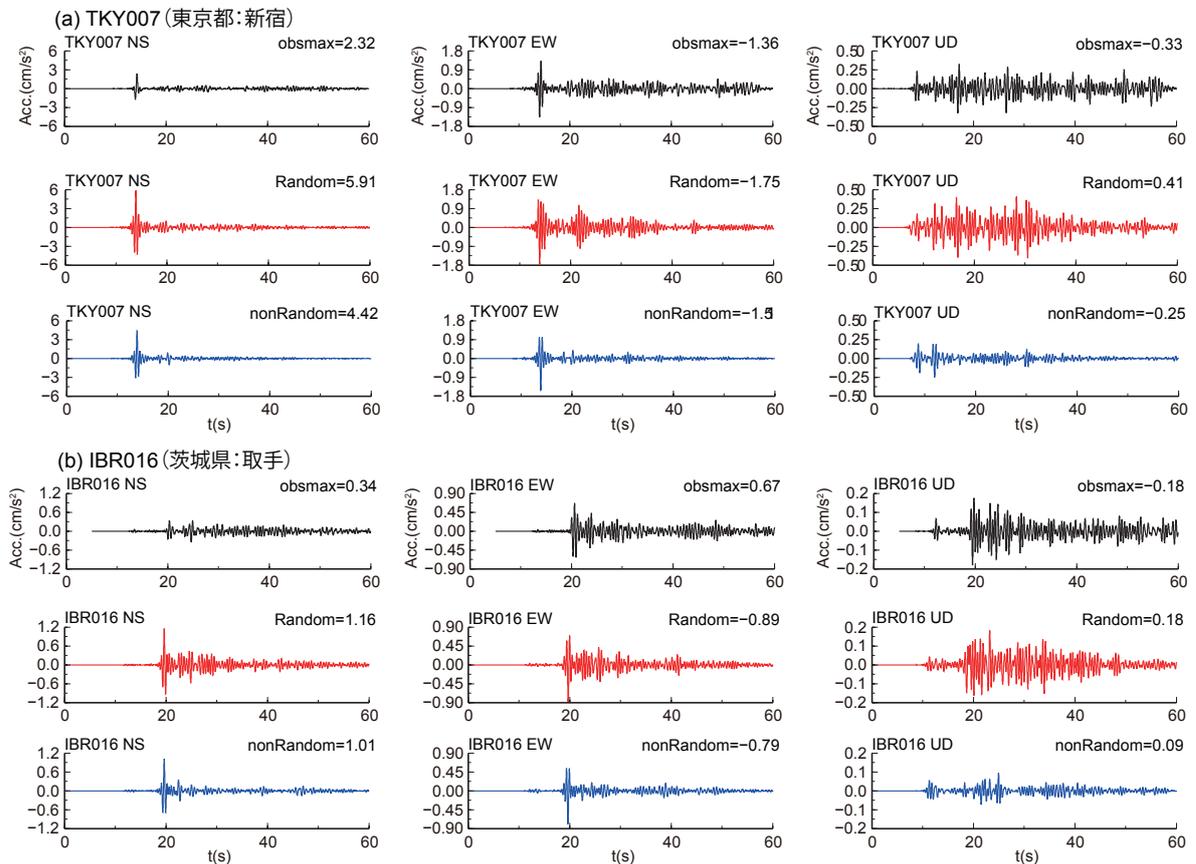


図 4 観測記録と計算結果の比較（加速度波形）

K-NET 観測点 (a) TKY007（東京都：新宿）、(b) IBR016（茨城県：取手）

（黒線：観測、赤線：ランダム媒質導入モデル、青線：従来モデル）

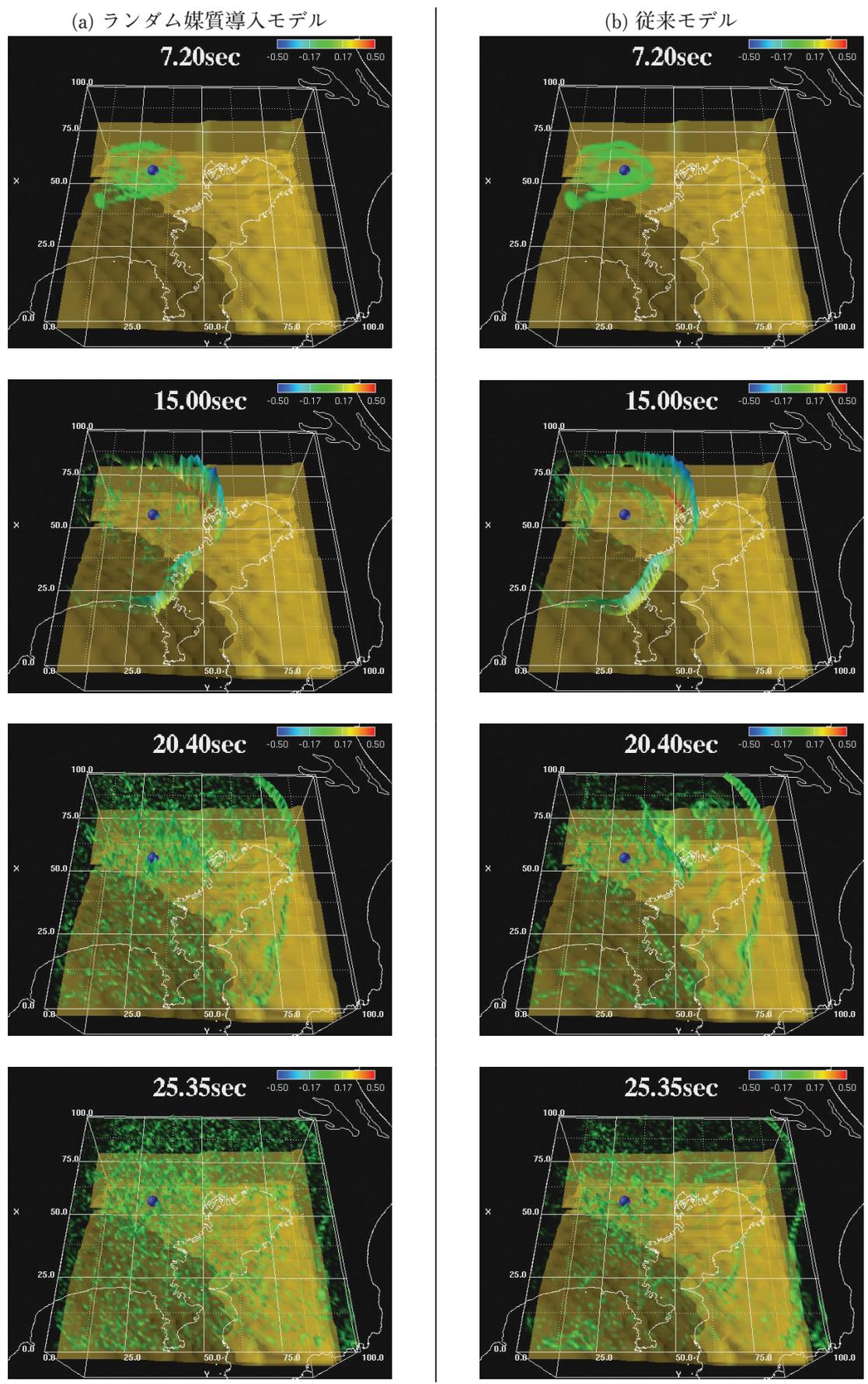


図 5 波動伝播の様子

3. 計算の発散対策に関する検討

前年度に検討した関東平野における1923年関東地震のシミュレーション（格子間隔50m、最小地震波速度=350m/sで1Hzまでの計算）においては、解の発散の問題が生じていたため、解決のための対策を実施した。図6に発散領域を含む小領域での計算結果を示す。発散は120秒間の計算のうち60秒前後から現れ始める。原因の究明のために、計算時間刻み、並列数、プログラムの最適化等についても検討し、最終的に地下構造モデルの地表に現れている数百m以下の薄い層が原因であることが分かった。そこで、図7に示すように、なるべく地下構造を変化させないように発散領域付近の構造を対象に、薄い層を削除する処理を施した。最終的に、図7dの全層に処理を加えた場合に発散が解消されることを確認した。同様の処理を加えた本計算のモデルでも発散が起こらないことを確認し、3次元モデル作成のためのノウハウを得ることができた。

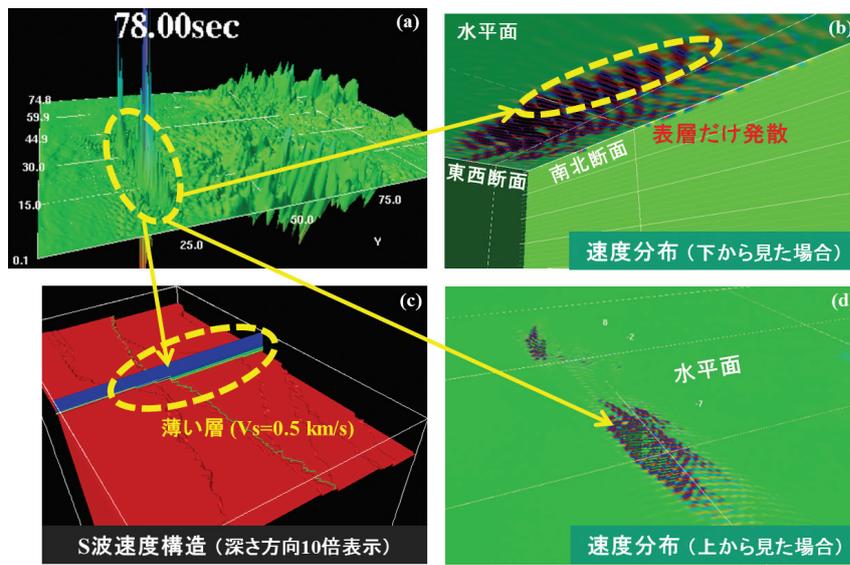


図6 発散領域を含む小領域での計算結果

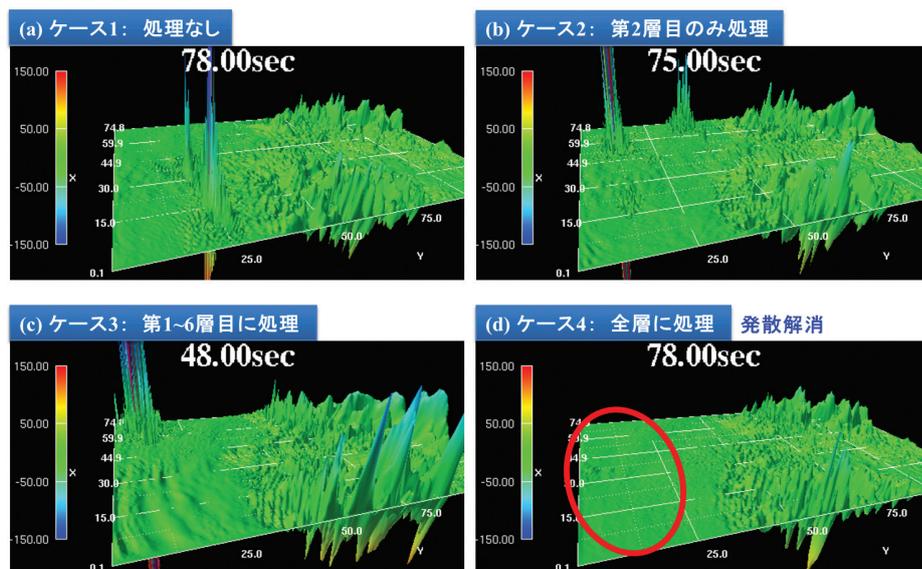


図7 発散対策の検討ケース

4. まとめ

大規模平野における 1 Hz 以上の短周期地震動の計算精度の向上を目的に、観測記録が豊富な関東地域で起こった中規模地震を対象に、従来の 3 次元地下構造モデルの層境界内の物性値にゆらぎを与えたランダム媒質導入モデルを用いた計算 (2 Hz まで) を実施した。その結果を観測記録と比較することにより、ランダム媒質導入モデルでは、特に後続波の再現性が向上することが分かった。波形の継続時間がより長くなる大地震のシミュレーションにおいても有効な手段となる可能性が示唆された。

また、前年度の 1923 年関東地震を対象とした検討では、計算において発散の問題が発生していたため、原因究明のための検討を行い、3 次元地下構造での地表に現れている数百 m 以下の薄い層が原因であることが分かった。また、それらの層を取り除くことで発散が解消されることを確認した。

今後はさらに現実的な 3 次元地下構造を考慮した広帯域地震動シミュレーションの計算精度を高めることにより、結果を高層ビルの設計用地震動、被害予測、ハザード評価、家具転倒などの屋内被害予測といった様々な分野へ適用することが可能と考えられる。

謝辞

東京大学情報学環総合防災情報研究センター (東京大学地震研究所兼務) の古村孝志教授にはプログラム開発および研究についての貴重なご指導、ご助言をいただきました。地球シミュレータの利用に際しては、独立行政法人海洋研究開発機構地球の新宮哲氏、上原均氏にご指導、ご協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 気象庁, 長周期地震動に関する情報のあり方検討会 (第 1 回) 資料, http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tyoshuki_kentokai/kentokai1/index.html, 2011.
- 2) 古村孝志, 前田拓人, 東北地方太平洋沖地震を踏まえた、南海トラフ地震の時間差連動による長周期地震動の再評価, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿, 2012.
- 3) 古村孝志, 齊藤竜彦, 構造不均質により生まれる地震波伝播の異方性, 平成 18 年度東京大学地震研究所研究集会発表資料, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/viewdoc/scat2006/14-Furumura.pdf>, 2006.
- 4) Kennett, B.L.N, and T. Furumura, Stochastic waveguide in the lithosphere: Indonesian subduction zone to Australian Craton, *Geophys. J. Int.*, 172, 363-382, 2007.
- 5) 武村俊介, 古村孝志, 前田拓人 (2011): リソスフェア内の不均質構造と表層地形が地震波動場におよぼす影響 - 高密度地震記録とシミュレーションの比較による検討 -, 平成 23 年度東京大学地震研究所研究集会発表資料, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/viewdoc/scat2011/25Takemura_et_al2011.pdf, 2011.
- 6) 地震調査研究推進本部, 長周期地震動予測地図 2009 年試作版, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/index.htm, 2009.