

15-NA12

海溝型巨大地震を対象とした 大規模並列地震波・津波伝播シミュレーション

竹中博士（岡山大学）

概要 本課題研究では時間領域差分法にもとづいて、沈み込み帯の巨大地震への応用を目的とした大規模地震波・津波伝播シミュレーション手法に関する研究に取り組んでいる。今年度の研究内容は次の通りである。[1] 海溝型巨大地震の研究と地震動評価を行ううえでは、地震波波形の再現性が鍵となる。平成 26 年度の研究では、海溝近傍の地震で観測された短周期表面波（周期 10 秒以下）の特徴を計算波形が再現できていないことが確認されていた。そこで今年度は東日本地域の陸海統合 3 次元構造モデルの再検討による短周期波動の再現性を考察した。この検討では大規模地震波伝播シミュレーションによって、①堆積物層の厚さや地震波速度を改変するパラメータスタディ (§5.1.3)、②改変したモデルで再計算したグリーンテンソル波形による逆問題解析 (§5.1.4)、③アジョイントカーネルの計算と考察 (§5.1.5)、を行った。これらにより構造モデルの浅い部分の改良で短周期側の再現性が改善する見通しや、周期 5 秒程度でもモデル改良には非対称な感度分布を考慮しなければならないことなどの知見を得た。[2] 地震波・津波統合シミュレーション (§5.2) では、南西諸島全域という広域にわたる計算を計画している。そのために昨年度は地震波部分の計算コードに関する最適化による演算の高速化を確認した。今年度は津波部分を含めた全体の最適化コードを用いて、海洋層を含む構造モデルのもとでの計算コードの性能と計算結果の確認を進めた。また地震波のみのテストとして 2015 年大分県南部地震を対象とした大規模シミュレーションを実施した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京大学 情報基盤センター
東京工業大学 学術国際情報センター

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

研究者所属・氏名	分担
岡山大学・大学院 自然科学研究科・ 竹中 博士	研究代表者・地震波- 津波統合プログラムの開発・全体の統括
東京工業大学・学術 国際情報センター・ 青木 尊之	副代表者・GPU 計算 の最適化、大規模並 列化、可視化等への 助言
東京工業大学・大 学院理工学研究科・ 岡元 太郎	副代表者・GPU 地震 波プログラム開発と TSUBAME での計算

研究者所属・氏名	分担
海洋研究開発機構・ 地震津波海域観測 研究開発センター・ 中村 武史	共同研究者・地震波- 津波統合プログラムの開発
東北大学・地震・噴火 予知研究センター・ 豊国 源知	共同研究者・地震波- 津波統合プログラム による東大 FX10 で の応用計算
岡山大学・大学院 自然科学研究科・ 小松 正直	構造モデル構築と東 大 FX10 による地震 波・津波計算

2. 研究の目的と意義

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（マグニチュード 9）は、強い地震動と巨大な津波によって東日本地域に計り知れないほどの地震災害・津波災害をもたらした。この地域ではマグニチュード 9 に達するほどの巨大地震が発生することはほとんど想定されていなかったため、こ

の地震の詳細な断層破壊過程を明らかにし、巨大地震発生に至った過程や強震動・津波の生成メカニズムを考察することが重要な研究課題となっている。さらに、得られた破壊過程モデルによる広域的な観測地震動の再現性も検討すべき課題である。これらは他の海溝型巨大地震（海洋プレート沈み込み帯の巨大地震）による強震動や津波を想定する際の基盤にもなるので、地震防災にも関連する重要な課題であると位置づけられる。

我々はこのような課題に取り組むために時間領域差分法（Finite-Difference Time Domain）による大規模地震波・津波伝播シミュレーション手法の開発と応用を進めてきた [1, 2]。この方法では食いだらけ格子を用いて媒質を離散化し、格子点に粒子速度ベクトルの各成分（合計 3 成分）と応力テンソルの独立な各成分（合計 6 成分）とを変数として割り当てる（図 1）。我々のプログラムには、不規則な固体・流体（海水）や自由表面形状（地形）などの海溝型地震のシミュレーションで不可欠になる要素を我々が開発した手法 [3, 4] によって取り入れている。

平成 26 年度には地震波・津波統合シミュレーション手法の確立に向けた検討と、東北地方太平洋沖地震の破壊過程推定や短波長地震波の再現性の研究などを行った。平成 27 年度にはこれらの研究を受け継いで、東北地方太平洋沖地震の大規模フォワード計算による東日本全域における地震動再現性の検討や、九州の南沖から台湾の東沖付近までにわたる南西諸島における 3 次元改良構造モデルを用いた既往地震の大規模地震波・津波統合シミュレーションを実施する。

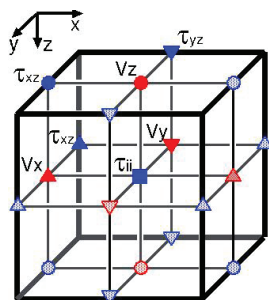


図 1 本研究で用いた食いだらけ格子の単位セルと変数の配置 [1, 2]。 V_i は速度ベクトルの成分、 τ_{ij} は応力テンソルの成分を示す ($i, j = x, y, z$)。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究では多数の GPU を用いた大規模並列計算によって地震波伝播のシミュレーションを行う。東京工業大学国際学術情報センターの TSUBAME スーパーコンピュータは 2013 年に GPU を更新して倍精度 5.7 ペタフロップスのピーク性能を有する、世界でもトップクラスの GPU クラスタである。そのため、本研究を進めていくうえで最適な環境を利用することができる。また、京コンピュータ等の CPU クラスタシステムの環境への対応も必要であることから、東京大学の FX10 では CPU 版プログラムにより地震波・津波統合シミュレーションを実施する。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

これまでの研究で、差分法にもとづく大規模地震波シミュレーション手法と地震波・津波統合シミュレーション手法の開発と、海溝型巨大地震の研究への応用を進めてきた。特に前年度は次の項目に取り組んだ。(1) GPU 演算カーネルの性能向上：TSUBAME-2.5 で実行するプログラムの GPU 演算部分について NVIDIA の Kepler アーキテクチャに対応した最適化を検討した。(2) 東北地方太平洋沖地震の解析に向けた短周期地震波再現性の検討：震源自体の複雑さを回避できる小地震データを対象として、TSUBAME-2.5 を用いた大規模地震波シミュレーションによってグリーンテンソル波形を生成した。それらを用いた逆問題解析によって、特に短周期の表面波の再現性について検討を行った。(3) 振動カーネル計算の効率化：波形再現性を向上させるためには構造モデルの改良が必要である。そこで構造モデル振動に関する波形の感度を表す振動カーネル計算のためにプログラムを改訂し、TSUBAME-2.5 において演算性能に大きな影響を及ぼすことなく出力ファイルサイズを大幅に低減することができた。(4) 東京大学 FX10 での計算高速化：各種の最適化を施したプログラムを利用して、地震波計算部分について FX10 での実行性能が改善されることを確認した。この結果、これまでは FX10 の short ジョブクラスでは実行不可能だった大規模計算が実行可能となった。

5. 今年度の研究成果の詳細

中間報告書以降に得られた成果は § 5.1.5 と § 5.2 の後半 (2015 年大分県南部地震) である。なお § 5.1.4 についても、中間報告書以降に新たなグリーンテンソル関数の大規模計算を追加実施した。

5.1 海溝型巨大地震についての地震動再現性の研究

5.1.1 地震動再現性の研究の背景

地震の破壊過程解析や、地震動の予測・想定を行う場合には計算波形が観測波形の特徴を良く再現する必要がある。我々はこれまでの研究で、東北沖を含む東日本地域の陸海統合 3 次元構造モデルを用いて、点震源で近似できる小規模地震の観測波形を「インパルス応答波形」とみなし、12-40 秒の周期帯では計算波形がこの観測インパルス応答波形を良く再現することを示してきた (図 2)。同時に、深さ方向のみに物性が変化する 1 次元構造モデルでは波形の特徴を再現できないことも示した (図 2)。これは地震波を用いた破壊過程解析や地震動の予測において適切な 3 次元構造モデルを使うことの必要性を表している。

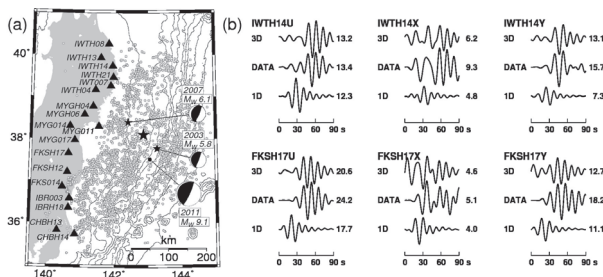


図 2 (a) 東北地方太平洋沖地震の震源 (星印)、GCMT 解および 1ヶ月間余震と、波形比較に用いた海溝に近い浅い地震 (2003 年 M_w 5.8)。 (b) 2003 年の浅い地震 (M_w 5.8) からの観測地動速度波形と計算波形との比較例。3D: 陸海統合 3 次元構造モデルによる計算波形。1D: 1 次元構造モデルによる計算波形。DATA: 観測波形。左から上下動 (U) と水平動 2 成分 ($X=N20E, Y=N110E$) で、数値は最大振幅 (10^{-3} cm/s)、周期帯は 12-40 秒である。

また昨年度の研究では東北沖の浅い地震について地震パラメータに関する波形逆問題解析と、震源位置に格子探索とを組み合わせた解析を行った。その結果、最適な震源位置を用いても、12-40 秒よりもやや短周期側の帯域 (7-40 秒) では観測波形の特徴を計算波形が再現できないことを見出していた [5]。これらの解析は海溝に近い浅い地震に関

するものであったので、より陸側の深い地震に関する波形再現性を確認する必要がある。また、構造モデルをどのように改良すれば波形再現性を向上させられるかが課題となっていた。

これらの結果を受けて今年度の前半では、陸側の地震も含めた波形再現性について特に表面波部分の観測波形と理論波形との比較による検討を行うことと (§5.1.2)、構造モデルのパラメータを改変したときの波形再現性を検討すること (§5.1.3、§5.1.4)、の 2 点を考察した。なお、これらの結果は、岡元・他 (地球惑星科学連合 2015 年大会) による。また今年度の後半には主にアジョイント・カーネルによる検討を実施した (§5.1.5)。

5.1.2 現状の構造モデルでの再現性

波形の再現性を検討するうえでは、有限断層の効果による複雑性を避けることが望ましい。そのために、本研究では点震源で近似できる小規模な地震を選択する。言い換えると、観測波形を地球のインパルス応答とみなすことになる。そこで、図 2 に示したように、2011 年東北地方太平洋沖地震の震源 (破壊開始点) を挟むように海溝側と陸側に位置する 2 つの地震を選択した (表 1)。いずれもプレート境界型の発震機構を持つ低角逆断層型の地震である。

地震	発生日	M_w	深さ	データ
海側	2003 年 11 月 3 日	5.8	12 km	強震動波形・ 遠地実体波
陸側	2007 年 12 月 25 日	6.1	30 km	強震動速度波 形

表 1 解析に利用した地震。深さは本研究の波形解析で決定した値。

この波形解析では最適な点震源パラメータを求めるために、点震源の発震機構を表すモーメント・テンソルと時刻歴を表す震源時間関数とを同時に推定する非線形逆問題手法 [6] を利用して、さらに点震源位置に関する格子探索を実施する。逆問題解析に利用したグリーンテンソル波形は陸海統合 3 次元構造モデル [7] に基づいて、我々が開発した並列 GPU 計算を用いる地震波伝播シミュレーションプログラム [1, 2] により生成した。計算には東京工業大学の TSUBAME を利用した。

このシミュレーションの詳しい結果は中間報告書に記載した。その結果を要約すると、①陸側に近い震源では長周期側 (12-40 秒) でも短周期側

(7-40 秒) でも、どちらも表面波の励起が弱く、先頭の波群に比べて後続波群が小さい。そしてどちらの周期帯でも計算波形は観測波形の特徴を再現できた。一方、②海側の浅い地震については長周期側と短周期側とで波形に大きな違いが見られた。とくに 7-40 秒のやや短周期側の周期帯では、観測波形には強く励起された表面波が後続波群として認められる。そして、短周期側では観測波形のこのような特徴を計算波形は再現できていない (図 3)。これは震源が浅い (12 km) ことだけでなく、震源付近の構造が陸域とは大きく異なり、海水層や堆積物層などの地震波速度の遅い物質が厚い層として存在していることも大きな原因になっていると考えられる。そのため短周期側 (短波長側) の現象を探るには構造モデルを改良していく必要がある。

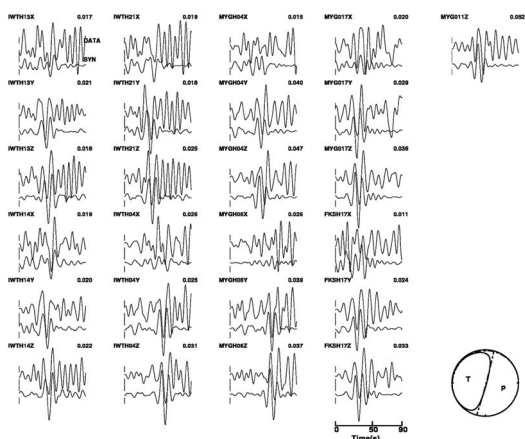


図 3 海側の浅い地震 (表 1) について、周期帯 7-40 秒の場合の最適点震源による観測強震動速度波形と計算波形との比較。遠地実体波波形データも同時に利用したが強震動波形のみを示す。モーメントテンソル解も同時推定したので、波形に並べて図示した。

5.1.3 構造モデルの改良 (1) : 波形のフォワードモデリング

まず構造モデル改良の方針を検討するために、現状の構造モデルパラメータを改変するフォワード計算を実施する。一般に表面波の振幅は浅い部分に地震波速度の遅い層が存在すると大きくなるため、次のような 2 種類の検討を実施した。

- 堆積物の S 波速度を小さくする。6 層の堆積物の厚さ (境界面の深さ) は変更せずに、各層の S 波速度を元のモデルの 70% に変更した。

- 堆積物の境界面を深くする (堆積物を厚くする)。震央を中心とする半径 50 km でコサイン型の形状を追加して最大 1 km だけ境界面を深くする。堆積物の地震波速度は変更しない。

そして、東京工業大学 学術国際情報センターの TSUBAME-2.5 の GPU を 585 台を利用した大規模地震波シミュレーションによるフォワード計算を 7 回実施した。詳しい計算条件と結果は中間報告書に記載した。それらの結果の要約として、堆積物層境界面を深くした場合には、上下動成分の後続波群の振幅が元の構造モデルを用いた場合よりもやや大きくなる傾向があることが見出された。これは観測波形の特徴にやや近づくことを意味する。

5.1.4 構造モデルの改良 (2) : 波形の逆問題解析

次に、改変した構造モデルによる短周期側 (07-40 s) における計算波形と観測波形の比較を試みた。その概略を述べる (詳細は中間報告書を参照)。この比較では逆問題解析で得られた最適震源パラメータを用いることにより、観測波形と理論波形の比較から構造モデル側の問題点を抽出できると考える。そこで 480 基の GPU を利用した大規模計算によってグリーンテンソル波形を生成して解析を行った。その結果、いずれの改変例でも後続波群の振幅が大きくなり、観測波形に近づく傾向を示した。堆積物層境界面を深く (厚く) した方が若干ながら後続波群が元の構造モデルを用いた場合より強くなることも見て取れた。このように堆積物層を改変することによって、計算波形が観測波形の特徴に近づくことは確認できた。またやや短周期帯での表面波再現性を向上させるうえでは、震源周辺での堆積物層の厚さを変えることが効果的であろうという方針も得られた。

5.1.5 アジョイント・カーネルを用いた検討

上記の検討では試行錯誤的な方法を用いたが、本格的に構造モデルの改良を進めるためには系統的な方法が必要となる。そこで本研究では 3 次元アジョイント・カーネルを用いた検討を行う。これは構造パラメータ摂動に関する波形の感度を調べるものである。

まず構造パラメータ (例えば剛性率 $\mu_0(\mathbf{x})$) の摂動 ($\delta\mu(\mathbf{x})$) に対する周波数領域での波形の変化

$\delta U(\omega)$ は、アジョイント・カーネル $K(\mathbf{x}, \omega)$ を使った体積積分によって

$$\delta U(\omega) = \int_V K(\mathbf{x}, \omega) \delta \mu(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (1)$$

のように表現される (詳しくは文献 [5])。なお以下では $\delta \mu(\mathbf{x}) = \epsilon(\mathbf{x}) \mu_0(\mathbf{x})$ と置いて、カーネルに剛性率をかけた $K(\mathbf{x}, \omega) \mu_0(\mathbf{x})$ を検討の対象とする。

設定項目	利用したパラメータ
全格子サイズ	4864 × 3200 × 1200
副領域サイズ	256 × 320 × 600
格子間隔	0.15 km
全領域サイズ	730 × 480 × 180 km
時間間隔	0.0071429 s
非弾性要素数	3
GPU 数	380
ステップ数	35000
計算時間	12874 s (*)

表 2 アジョイント・カーネル計算のための差分法シミュレーションのパラメータ。(*) 計算時間は 6 ケースの平均値で、ファイル I/O の時間他を含む。

式 1 のカーネル $K(\mathbf{x}, \omega)$ は、観測点と震源とのペアに対して一つずつ定まる。このカーネルを計算するには、震源項による計算波動場と観測点に置いた仮想的な力源による計算波動場を干渉させればよい。そこで 2014 年度の研究で開発したプログラムを使ってこれらの計算波動場を大規模シミュレーションによって生成する。このシミュレーションのパラメータは表 2 にまとめた。

計算例として、ここでは表 1 の海側地震と観測点 IWATH21 (岩手県) とをペアにしたカーネルを示す。図 4 には周期 12.8 秒のカーネルの断面図を描いた。感度が大きい部分 (色が濃い部分) は空間的に幅を持つことが分かる。これは第 1 フレネルゾーン程度の幅になっていると考えられ、有限波長の効果を示す。感度は深さと共に次第に弱くなる。また、この周期ではカーネルの空間分布は震源と観測点とを結ぶ直線経路に沿ってほぼ対象である。これは波動場が比較的単純になっていることを示すと考えられ、この周期帯では計算波形が観測波形を良く説明できることに呼応している。一方、より短周期 (短波長) である周期 5.1 秒では、カーネルの空間分布が直線経路に沿って非対称になる (図 5)。つまり波の経路が曲がっており、速度構造を改良する際にはこのような感度分布を考慮に入れる必要がある。

また、深さとともに感度がどのように変化するかについて目安を得るために、感度分布を深さ方

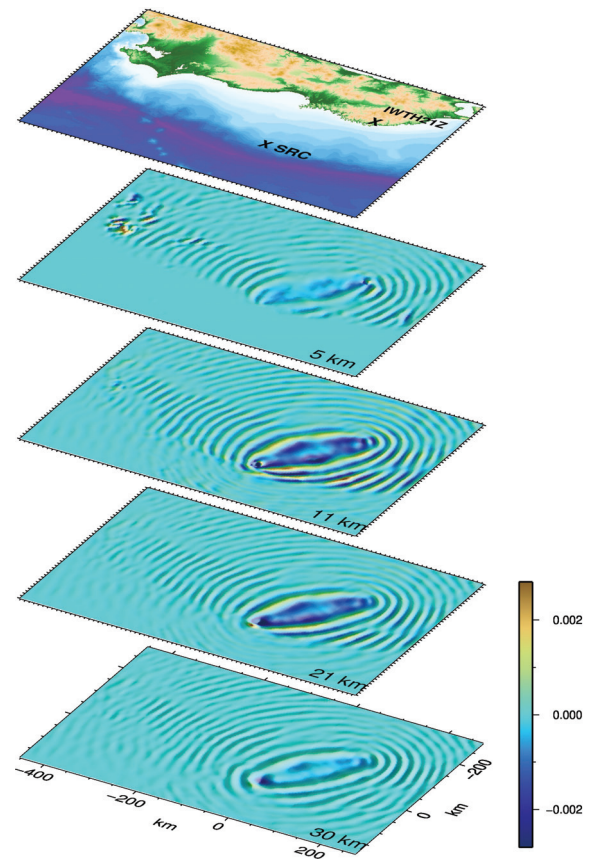


図 4 周期 12.8 秒の地震波について、海側の浅い地震 (表 1) と観測点 IWATH21 とのペアで計算したアジョイント・カーネル (剛性率をかけた $K(\mathbf{x}, \omega) \mu_0(\mathbf{x})$)。カーネルは 3 次元分布するので、いくつかの断面を示した。最も上の図は地形であり、×印が震央 (SRC) と観測点 (IWATH21) とを示す。2 枚目以降がカーネル断面図であり、上から 3 枚目の図が震源の深さ (11 km) の断面図である。

向に z まで積分した量 ($S(z)$) を考える。

$$S(z) \equiv \int dx \int dy \int_0^z K(x, y, z; \omega) \mu_0(x, y, z) dz \quad (2)$$

この $S(z)$ を各ケースで規格化したものを図 6 に示す。周期 12.8 秒 (赤線) では深さ 30 km 付近まで単調に近い変化となっており、深くまで波動場が染みこんでいることがわかる。一方、短周期 (7.3 秒 (緑線), 5.1 秒 (青線)) になるほど、深さとともに急速に $S(z)$ が飽和する。したがって浅い構造を改良するには短周期側のデータが重要になることが示唆される。短周期側で波形の再現性が低下することを考えると、§ 5.1.3, § 5.1.4 で浅い部分について試行錯誤的に考察したことが妥当であったこともわかる。

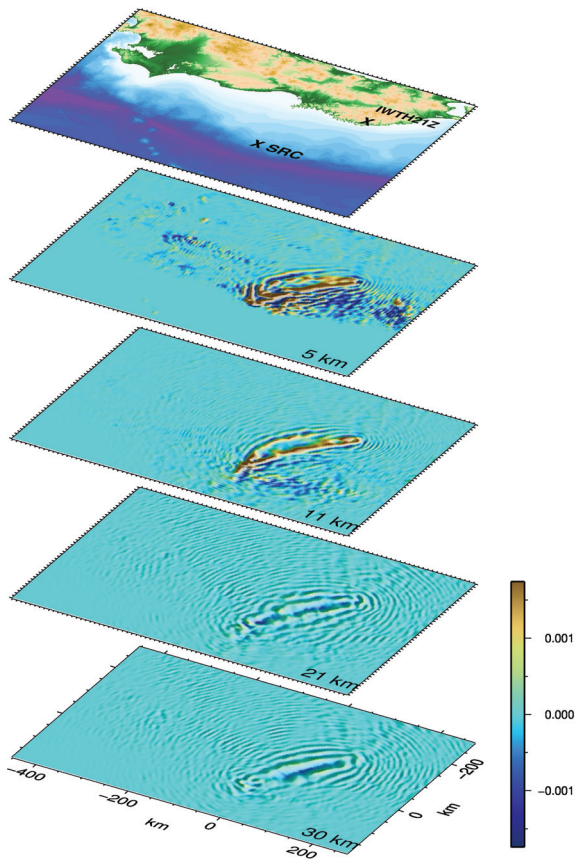


図 5 図 4 と同様に、周期 5.1 秒の地震波についてカーネルを描いたもの。

5.2 地震波・津波統合シミュレーション

海溝型巨大地震では地震波だけでなく津波も励起される。そこで我々はこれらを同一の構造モデルのもとで統合的に扱い、破壊過程モデルと津波励起・伝播との関係についての研究を進めている。そのために我々は独自の地震波・津波統合シミュレーション手法の開発を行っている。最終的にはこれらを海洋に囲まれているために技術的な面で強震動予測が立ち遅れている島嶼地域における地震動や津波の想定に応用することを目指す。

昨年度は、地震波計算部分に各種の最適化を追加した統合シミュレーションプログラムについて、地震波計算のみの場合で最適化の効果を東京大学情報基盤センターの FX-10 を利用して検討した。その結果、計算条件にも依存するが、津波項の計算を含む旧プログラムと比較した例では約 20 倍程度の高速化を確認できた。

この結果を受けて、今年度はまず、津波計算部分を含めた全体に最適化を施したプログラムについてチェックを進めている。一例として、ステップ状の海水層を含む構造モデル (図 7) について、

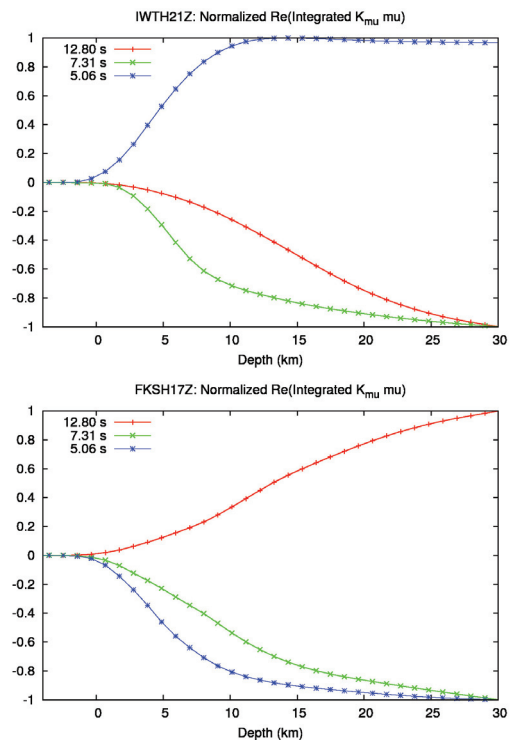


図 6 式 2 の $S(z)$ の実部を各トレースの最大値で規格化して描いたもの。左側：IwTH21 観測点。右側：FKSH17 観測点。

表 3 の計算パラメータにより実施した 3 次元地震波・津波統合シミュレーションのテスト計算結果を図 8 に示す。最初の 30 秒間ほどは動的な変動に伴って海水が大きく沈降し、その後、海岸近くに短波長のやや大きな津波が集中する様子が示されている。このように最適化後のプログラムで、海底面のごく近傍 (数格子点~10 格子点程度) に断層を置いた場合でも安定に地震波・津波統合シミュレーションができていたことが確認できた。地震波・津波統合シミュレーションについては、より

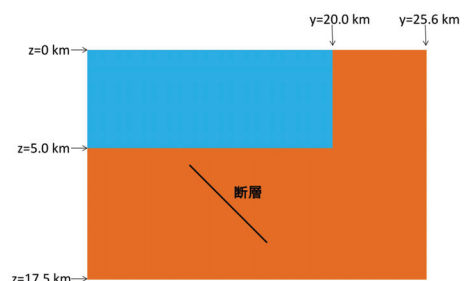


図 7 地震波・津波統合シミュレーションのチェック用の構造モデルの断面図。2 次元的なステップ形状を持つ単純化した深さ 5 km の海水層 (剛性率はゼロ) と固体層 (剛性率 9.5 GPa) からなる。計算は 3 次元で行う。断層モデルはモーメントマグニチュード 6.0 に相当する。

設定項目	利用したパラメータ
全格子サイズ	210 × 256 × 200
格子間隔	0.10 km
全領域サイズ	21.0 × 25.6 × 20.0 km
空気層	海面から 2.5 km
非弾性要素数	6
時間間隔	0.01 s
ステップ数	20000
ノード数	50
コア数	800
計算時間	960 s (*)

表 3 地震波・津波統合シミュレーションのテスト計算のパラメータ。東京大学情報基盤センターの FX10 を利用したもの。「空気層」は不規則な固体自由表面を自動的に導入するためのものである。

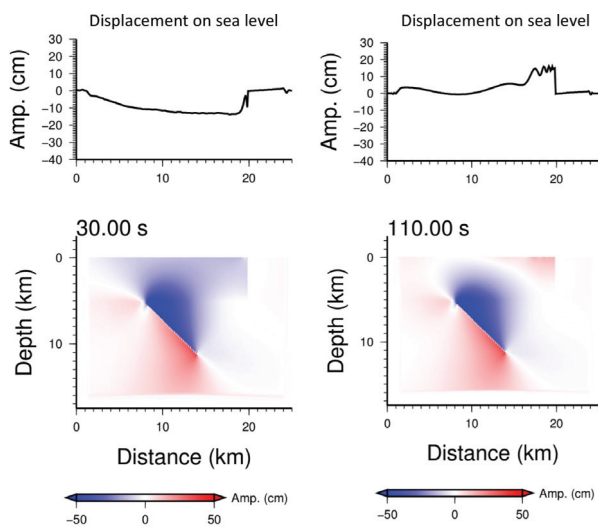


図 8 上の図は海岸線に直交する測線で抽出した地表および海水面の上下変動プロファイル。下の図は対応する時刻での上下変動の断面スナップショット。青は沈降、赤は上昇を示す。

大規模な計算や地球の曲率を含めることの検討と作業を引き続き進めている。

これと平行して、地震波のみの大規模シミュレーションのテストも進めた。その例として、2015 年大分県南部地震 ($M_J5.7$) における大分県周辺の地震動シミュレーション結果を示す。このシミュレーション例では東大 PRIMEHPC FX10 の 216 ノードを用いた大規模計算によって、震源の深さを様々に変えてシミュレーションを実施した。なお構造モデルには海水層も含まれている。スナップショットは、震源の深さ 48 km の場合の結果である。このようにして理論波形と観測波形との比較を行い、最適な震源モデルや強震動の特徴の抽出を進めて行く予定である。

格子間隔	50 m
$N_x \times N_y \times N_z$	2001 × 1801 × 1411
Δt	0.0025 s
時間ステップ	20000
ノード数	216
(16 コア/ノード)	(216 × 16 コア)
所要計算時間	約 3 時間
使用メモリ	約 2.7TB

表 4 2015 年大分県南部地震 ($M_{JMA}5.7$) における大分県周辺の地震動シミュレーションの計算パラメータ。計算には東大 PRIMEHPC FX10 を利用した。

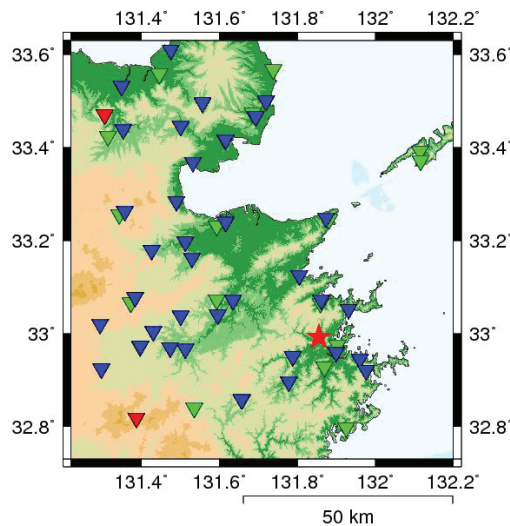


図 9 計算領域と震央 (星印) 及び既存の地震観測点。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

6.1 地震動再現性の研究

今年度は、割り当てられた計算資源のほぼ全てを利用して大規模なフォワード計算やグリーンテンソル波形計算を繰り返し、東北沖の浅い地震について構造モデルを改善する方針を検討できた (§5.1.2、§5.1.3、§5.1.4)。また、3次元アジョイント法を用いた構造パラメータ摂動の感度解析を複数の観測点で試行的に実施した。これにより周期帯ごとの波動場の感度分布や、深さ方向分布などの定量的で系統的な考察を行うことができた。今後はこの方法をより多くの観測点・地震のペアで実施し、試行的な構造モデル改良につなぐことを検討する。そしてその結果に基づく大規模フォワード計算で波形再現性をあらためて検証することを展望している。

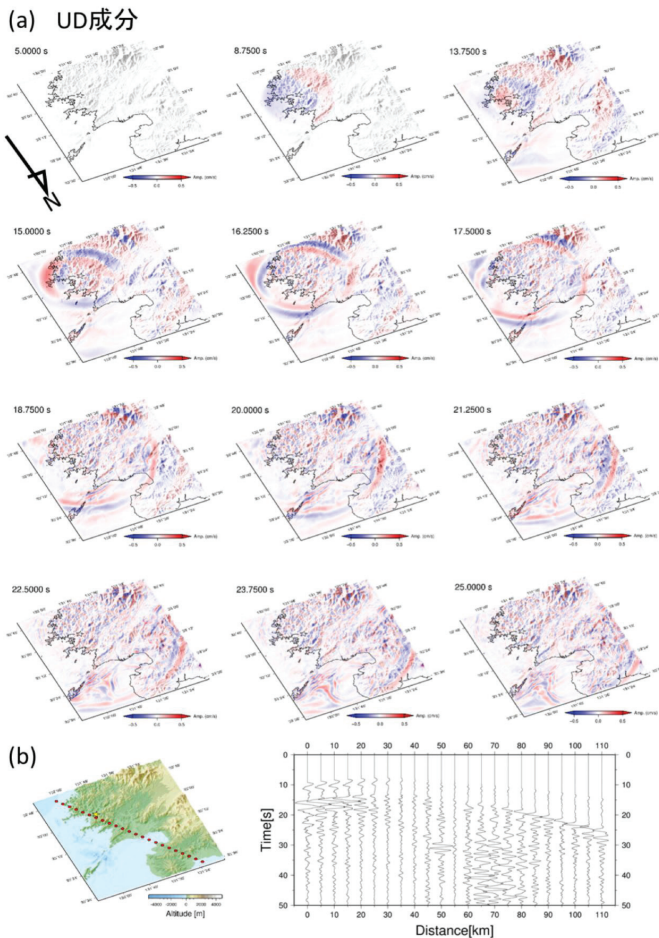


図 10 (a) スナップショット (UD 成分)。震源の深さ 48 km の場合の波動伝播を示す。星印が震央を表し、愛媛県側から大分県方向を見ている。(b) 震央を通る北西-南東方向に設置した線状アレイ観測点の位置と計算波形のペーストアップ (UD 成分)。北西に向かって距離が大きくなる。

6.2 地震波・津波統合シミュレーション

割り当てられた資源のほぼ全てを利用して各種のテスト計算とプログラム開発を進めており、次のように進捗した。まず上述のように、津波計算部分を含めて最適化したプログラムによるテスト計算を実施し、最適化後の計算の安定性や計算性能をチェックすることができた。同時に、より大規模な計算や地球の曲率を含めることの検討とテスト計算も進めてきた。これらは今後も継続する予定である。また、大規模地震波シミュレーションのテストとして 2015 年大分県南部地震の強震動シミュレーションを進めた。今後、このような計算により構造モデルの検証や震源モデルの検討を進めることが展望される。

7. 研究成果リスト

- (1) 学術論文
該当なし。
- (2) 国際会議プロシーディングス
該当なし。
- (3) 国際会議発表

Hiroshi Takenaka, Masanao Komatsu, Genti Toyokuni, Takeshi Nakamura, and Taro Okamoto, Quasi-Cartesian Finite-Difference Computation of Seismic Wave Propagation for a Three-Dimensional Sub-global Earth Model, *American Geophysical Union 2015 Fall Meeting*, Moscone Center, San Francisco, California, USA, 2015 年 12 月 14-18 日。

Takeshi Nakamura, Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka, Complex Seismic Wavefield of Long-Period Components around the Nankai Trough in Southwest Japan and its Effect on Source Mechanism Analyses, *American Geophysical Union 2015 Fall Meeting*, Moscone Center, San Francisco, California, USA, 2015 年 12 月 14-18 日。

- (4) 国内会議発表

岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之、2011 年東北地方太平洋沖地震の不均質構造モデルを用いた破壊過程解析 (5)：相互相関係数による考察、日本地震学会秋季大会、S08-P05、神戸国際会議場 (兵庫県神戸市)、2015 年 10 月 27 日。

中村武史・岡元太郎・竹中博士、南海トラフ域における長周期地震動成分の伝播特性と震源メカニズム解析に与える影響の評価、日本地震学会秋季大会、S06-03、神戸国際会議場 (兵庫県神戸市)、2015 年 10 月 27 日。

中村武史・竹中博士・岡元太郎・金田義行、紀伊半島周辺における陸上及び海底地すべりによる波動伝播シミュレーション、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、HDS26-02、幕張メッセ国際会議場 (千葉県幕張市)、2015 年 5 月 26 日。

竹中博士・豊国源知・中村武史・小松正直・

岡元太郎、長大距離地震波動伝播シミュレーションのための地球の曲率を考慮した計算スキーム、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、SSS26-06、幕張メッセ国際会議場（千葉県幕張市）、2015 年 5 月 26 日。

岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之、大規模シミュレーションによる沈み込み帯地震からの短周期表面波の再現性検討、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、SSS25-P02、幕張メッセ国際会議場（千葉県幕張市）、2015 年 5 月 25 日。

中村武史・竹中博士・岡元太郎・大堀道広・坪井誠司、南海トラフにおけるやや長周期地震動の観測とシミュレーションによる再現、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、SSS25-18、幕張メッセ国際会議場（千葉県幕張市）、2015 年 5 月 25 日。

(5) その他（特許、プレス発表、著書等）
該当なし。

参考文献

- [1] Okamoto, T., H. Takenaka, T. Nakamura, and T. Aoki, Accelerating Large-Scale Simulation of Seismic Wave Propagation by Multi-GPUs and Three-Dimensional Domain Decomposition, *Earth, Planets and Space*, **62**, 939–942, 2010.
- [2] Okamoto, T., H. Takenaka, T. Nakamura, and T. Aoki, Accelerating Large-Scale Simulation of Seismic Wave Propagation by Multi-GPUs and Three-Dimensional Domain Decomposition, in *GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering*, D. A. Yuen et al. (eds.), Chapter 24, DOI:10.1007/978-3-642-16405-7_23, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [3] 岡元太郎・竹中博士, 速度・応力型差分法での固体・流体境界の扱いについて, *地震*, 第 2 輯, **57**, 355–364, 2005.
- [4] 中村武史・竹中博士・岡元太郎・金田義行, 流体—固体境界周辺における 3 次元地震波動場の差分解法に関する数値実験, *地震* (第 2 輯), **63**, 189—196, 2011.
- [5] 竹中博士, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 平成 26 年度共同研究 最終報告書, 14-NA25, 2015.
- [6] Okamoto, T. and H. Takenaka, Effect of near-source trench structure on teleseismic body waveforms: an application of a 2.5D FDM to the Java trench, in *Advances in Geosciences*, **13** (Solid Earth), ed. Kenji Satake, 215–229, doi: 10.1142/9789812836182_0015, World Scientific Publishing Co., Singapore (2009).

- [7] Okamoto, T., H. Takenaka, T. Nakamura, and T. Aoki, Large-scale simulation of seismic-wave propagation of the 2011 Tohoku-Oki M9 earthquake, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, 349–360, 2012.