

jh160029-NAH

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。今年度は次のような研究を進めた。[1] 南西諸島域の地球内部構造モデル (§5.1)：この地域の構造モデル（特に減衰構造）を検討するために、大規模地震波シミュレーションを実施した。南西諸島域から複数の領域を抽出し、3次元構造モデルにもとづくシミュレーションを東大 FX-10 で実行して計算結果の検討を進めている。[2] 準デカルト座標系スキーム (§5.2)：広域の地震波伝播シミュレーションを目的として、既存のデカルト座標系用のプログラムにわずかな追加を施すことにより曲率の効果を導入できる「準デカルト座標系スキーム」の研究を進めている。本年度は東大 FX-10 を利用したシミュレーションにもとづいた結果を論文として出版した。[3] 九州西方沖地震活動の解析 (§5.3)：南西諸島域の地震波再現性や地球内部構造モデルの検討という本課題のテーマに関連して、2016 年 4 月の熊本地震活動と相前後して発生した九州西方沖地震活動の研究を実施した。この項目では東工大 Tsubame-2.5 を用いた大規模シミュレーションによってグリーンテンソル波形を計算し波形再現性を検討した。その結果、現状の構造モデルでは周期 10 秒程度以上の長周期では計算波形による観測波形の再現性が良いことを確認できた。[4] 東北沖構造モデルの改良 (§5.4)：本課題では波形を使った逆問題解析により東北沖の地球内部構造モデルを改良することも研究テーマとしている。今年度は、多数の大規模地震波シミュレーションを実施し、その計算結果をもとにして摂動カーネルを作成して逆問題解析の検討を進めた。

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
防災科学技術研究 所・地震津波防災研 究部門・ 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 観測センター・ 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 (M9 (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。そのため、この地震の詳細な断層破壊過程を推定することと、その知見をもとにして巨大地震発生や強震動・津波

の生成メカニズムを考察することや、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を検討することが課題となっている。これらは他の海溝型巨大地震（海洋プレートが沈み込む地域の巨大地震）による地震動や津波を評価するうえでの基盤ともなる。さらに、これらの研究の過程で得られる地球内部構造や地震波伝播シミュレーション手法に関する知見は、熊本地震（M7.3）や鳥取県中部の地震（M6.6）など 2016 年にも相次いで発生した内陸部の地震に関する強震動の評価や地震の破壊過程解析にも応用できる。このように、本課題の研究は日本列島で発生する地震の多くにつながっており、地震防災にも関連する意義を持つもの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, 3]。この方法では食い違い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 [4, 5] によって取り入れている。

平成 28 年度は地震波の再現性をテーマとして、東北沖での地球内部構造モデル改良の検討や、南西諸島全域での大規模地震動及び地震波・津波統合シミュレーションによる構造モデル検討などを研究課題とした。

また、課題申請後の 2016 年 4 月に熊本地震（M 7.3）が発生し、九州地方に大きな被害がもたらされた。周辺では南西諸島に関係する海域での地震活動も発生していることから、本課題でも当初計画に関連する追加テーマとして、熊本地震および周辺（南西諸島域）の地震活動に関する検討を研究期間の前半に実施した。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本課題では現実的な陸海統合 3 次元構造モデルのもとで、時間領域差分法（FDTD）を用いて近似によらずに地震波伝播シミュレーションを実施する。周期 1-2 秒から数秒程度の短周期地震波を計算するためには 100 m 程度以下の格子間隔で数

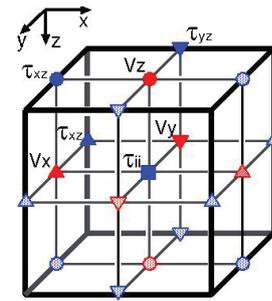


図 1 本研究で用いた食い違い格子の単位セルと変数の配置 [1, 2]。 V_i は速度ベクトルの成分、 τ_{ij} は応力テンソルの成分を示す ($i, j = x, y, z$)。

百 km スケールの領域を離散化することから、数百億格子点に達する大規模な格子サイズが必要となる。このレベルの大規模計算のためには東京大学情報基盤センターおよび東京工業大学学術国際情報センターのスーパーコンピューターが不可欠であることから、本課題ではこれらの拠点を利用させていただくこととした。東工大の TSUBAME-2.5 では GPU により加速されたプログラムを用いて 300GPU (100 ノード) を超える資源を利用したシミュレーションを実施する。また東大の FX10 では最適化されたプログラムを用いて 200 ノードを超える資源を利用したシミュレーションを行う。

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・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。前年度は特に次の項目に取り組んだ。

[1] **地震波波形の再現性の考察** 海溝型巨大地震の研究と地震動評価を行うためには、地震波波形の再現性が鍵となる。前年度に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、(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、(3) アジョイントカーネルの計算と考察、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が得られた。また周期 5 秒程度でもモデル改良のためには震源-観測点間の大円経路に関して空間的に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。

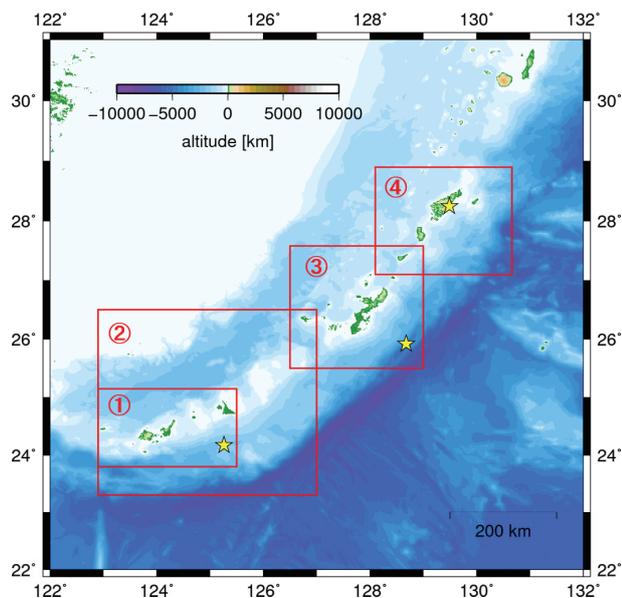


図 2 南西諸島域のシミュレーション範囲(赤枠)。それぞれの枠に付した番号は表 1 の番号と対応する。

[2] 地震波・津波統合コードのテスト 地震波・津波統合シミュレーションでは、南西諸島全域という広域にわたる計算を計画している。そのため平成 26 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。前年度(平成 27 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 年大分県南部地震に関する大規模シミュレーションを実施した。

5. 今年度の研究成果の詳細

本課題のテーマの一つは、南西諸島域を対象とした地球内部構造や地震波(強震動)再現性の検討を進めることである。また本課題では南西諸島域を含む広域の地震波伝播を計算することを目標としており、その場合には地球の曲率を考慮に入れる必要も出てくる。また主に東北沖を対象領域として、波形データを用いて地球内部構造モデルを改良する手法を検討するテーマも設定した。これらのテーマに関連して、本年度は下記の研究を行った。なお①、②、④が中間報告以降の成果である。

- ① 南西諸島域の大規模シミュレーション (§5.1)
- ② 準デカルト座標系スキーム (§5.2)
地球の曲率を取り入れる手法として「準デカルト座標系」の差分法スキームを研究し、成果を論文として発表した(Takenaka et al. 2017)。

計算地域	格子サイズ	計算時間
① 先島諸島	1501 × 2701 × 701	5931.5 s (1.6 時間)
② 先島諸島(広域)	3541 × 4091 × 701	17577 s (4.9 時間)
③ 沖縄本島周辺	2301 × 2501 × 701	8322.5 s (2.3 時間)
④ 奄美諸島	2001 × 2501 × 701	7508 s (2.1 時間)

表 1 地域別の領域サイズと計算時間。番号は図 2 の番号と対応する。

項目	パラメータ
格子間隔	0.1 km
時間間隔	0.005 s
時間ステップ数	20000
非弾性要素数	3
ノード数	216
プロセス数	432
スレッド数	8

表 2 南西諸島域シミュレーションに用いた差分法計算(HOT-FDM)のパラメータ(全ケースに共通)。計算には東大 FX-10 を利用した。

- ③ 九州西方沖の地震活動の研究 (§5.3)
2016 年熊本地震活動に関連して、相前後して発生した九州西方沖の地震を解析し、成果を論文として投稿した(Okamoto et al. 暫定受理)。
- ④ 東北沖の地球内部構造モデル (§5.4)
東北沖の地球内部構造モデルについてアジョイント・カーネルを作成して地震波波形データから構造モデルを改良する手法の検討を進めた。

なお上記③に関連して、熊本地震活動に伴って発生した大分県中部地震(2016 年 4 月 16 日 7 時 11 分 M5.4、最大震度 5 弱)について地震波シミュレーションを使った検討も行き、中間報告書で報告した(2016 年度中間報告書 §5.3)。

5.1 南西諸島域の大規模シミュレーション

島嶼地域は海洋に囲まれていることから技術的な面で強震動予測が立ち遅れている部分がある。本研究では南西諸島域を主な対象として、そのような島嶼地域における地震動の再現性や津波発生・伝播の研究を進めるための手法開発と応用を目的の一つとしている。

地震波の再現性は地球内部構造モデルとも相互

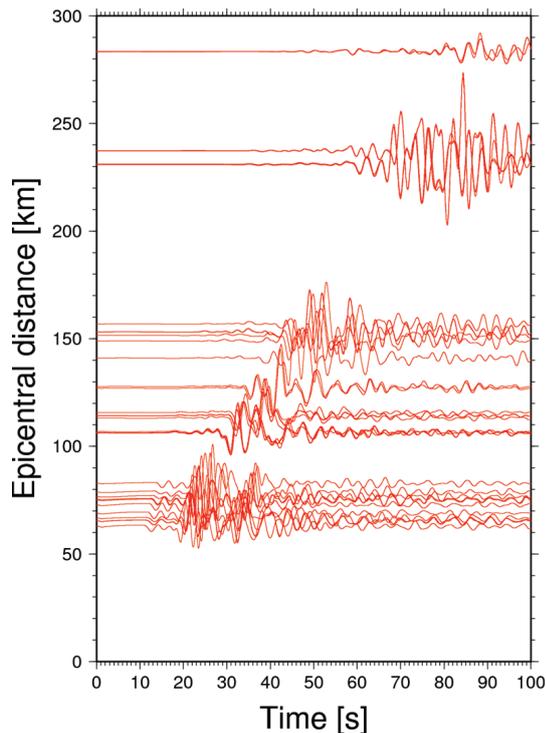


図 3 図 2 の領域②のシミュレーションによる計算波形。横軸を時間、縦軸を震央距離にとり、波形の鉛直成分を並べた。距離減衰（実体波では $\sim 1/r$ ）により遠方では振幅が小さくなるため、各波形に震央距離をかけて振幅を強調した。

に関係していることから、今年度は地球内部構造、とくに地震波の減衰構造（Q 値）のトモグラフィ結果 [6] をシミュレーションの構造モデル（P 波・S 波の非弾性要素）に反映させて大規模シミュレーションを試行した。

まず南西諸島から 4 地域を抽出し（図 2），それぞれの地域について差分法計算領域を設定した（表 1）。そして各領域について下記の各モデルをコンパイルして差分法計算用の構造モデルをそれぞれ作成した。構造モデルには地形や海水層も含まれる。

- 陸上地形：国土地理院 250m メッシュデータ
- 海底地形：JTOPO30v2 [7]
- 地盤構造：J-SHIS モデル [8]
- 地殻・マントル・スラブ：全国 1 次地下構造モデル [9]

これらの構造モデルを利用して、差分法（HOT-FDM[3]）による大規模地震波伝播シミュレーションを行った。計算パラメータは表 1 および表 2 にまとめた。計算には東大情報基盤センターの FX10 を使用し、MPI と openMP を用いた並列計算を行った。

このようにして計算した地震波形と地球内部波

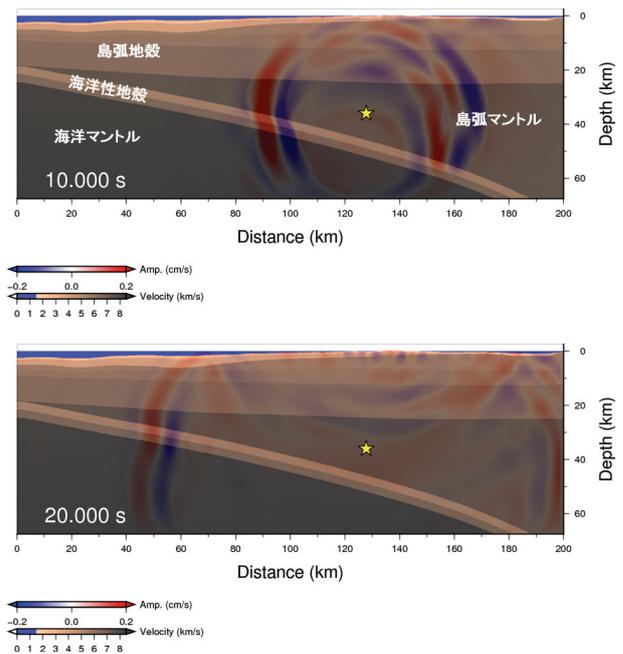


図 4 図 2 の領域④のシミュレーションによる波動場（鉛直成分）のスナップショット。計算に用いた構造モデルについて震源を通る南北断面図を抽出し、波動場の振幅をカラースケールで重ねて示したものである。

動場のスナップショットの例を図 3 と図 4 に示す。スナップショットの図から、波動場が地球内部構造（沈み込むフィリピン海プレートや浅い部分の不規則な地盤構造）に応じて伝播経路が歪んだり振幅が強調されたりしている様子がわかる。これらの伝播経路を考察することにより、今回構造モデルで考慮した不均質な減衰構造のどの部分が図 3 の波形のどの部分に関連しているかを検討することができる。現在、これらの計算結果をもとにしてそのような考察を進めており、今後継続して地球内部構造モデルの改良と地震動の再現性に関する検討を行う予定である。

5.2 準デカルト座標系スキーム

前項の南西諸島域のシミュレーション（§5.1）ではデカルト座標系を利用して平坦地球近似のもとで地震波伝播の計算を行った。しかし、図 2 に示す南西諸島全域のような広域の地震波伝播シミュレーションを実施するためには、地球の曲率を考慮する必要が生じてくる。そのため本課題研究ではこれまで継続して、地球の曲率を取り入れる手法を研究してきた。これまでに近距離の地震波伝播計算用には多くのデカルト座標系プログラムが開発され応用されている。本研究で提案する準デカルト座標系スキームは、それらの既存のデカル

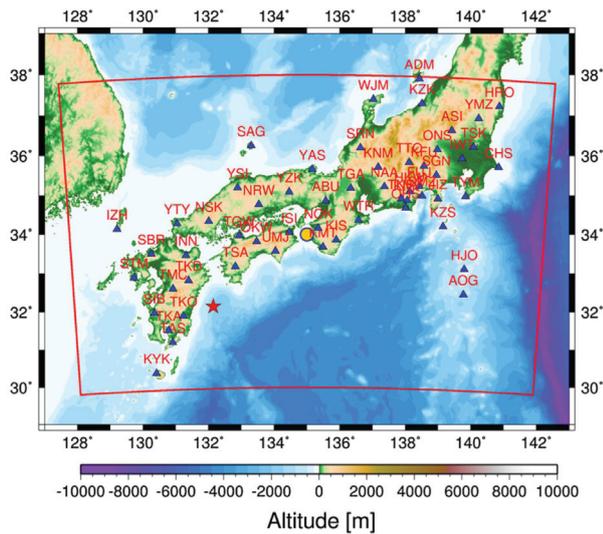


図 5 準デカルト座標系スキームによるシミュレーション例の計算領域（赤枠）。赤い星マークは計算に用いた震源の震央、青い三角マークは観測点位置を示す。Takenaka et al. (2017) より引用。

ト座標系用のプログラムにわずかな追加を施すことにより曲率を持つ地球の地震波伝播計算を可能にするものである。今年度はその成果をまとめて論文として投稿し出版した (Takenaka et al. 2017 年 5 月出版)。

一例として日本周辺の広域地震波伝播シミュレーション結果を示す。この計算では図 5 に示した計算領域に 3 次元地球内部構造モデルを設定し、 $1601 \times 2401 \times 401$ の格子を用いて、デカルト座標系スキームの計算波形と、曲率を取り入れた準デカルト座標系スキームによる計算波形とを比較した。時間ステップは 0.025 s とした。この計算には東京大学の FX-10 を利用した。図 6 には、遠方（震央距離 859.3 km ）での計算波形を示した。図からわかるように特に 200 秒付近の S 波から、曲率を考慮した場合（準デカルト座標系スキーム：赤い波形）と、平坦な地球モデルによる場合（デカルト座標系スキーム：緑の波形）との間の相違が大きくなる。この周期帯 ($10\text{--}20 \text{ s}$) では、震央距離が 500 km を超えるあたりから、両者の波形の相違がはっきりしてくる。この方法は従来の近距離用計算手法を遠距離用計算へと拡張するものであり、マルチスケールの研究に道を開く役割を持つと期待している。

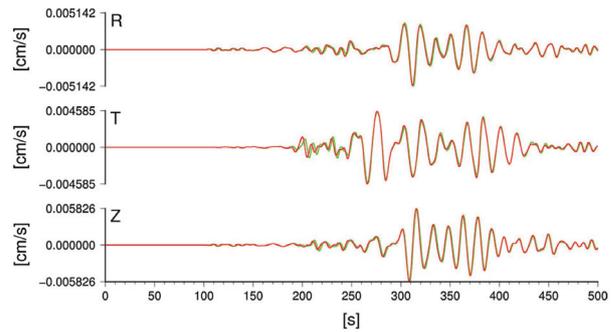


図 6 準デカルト座標系スキームによる地動速度の計算波形例（赤い波形）。筑波（TSK、震央距離 859.3 km ）における動系方向水平成分 (R)、動系に直交する水平成分 (T)、上下動成分 (Z) を示す。緑の波形はデカルト座標系スキームによる。波形には通過帯域 $10\text{--}20 \text{ s}$ のバンドパスフィルターをかけた。Takenaka et al. (2017) より引用。

5.3 九州西方沖の地震活動

2016 年 4 月 14 日から熊本県でマグニチュード 6 を超える地震を含む地震活動が始まり、熊本県と隣接する地域に大きな被害が発生した。一連の熊本地震活動の中で最大のものは 4 月 16 日の M7.3 の地震である。さらに熊本地震後に、熊本地震活動地域を西側に延長した海域でも地震活動が見られた。この海域では熊本地震の約 5ヶ月前の 2015 年 11 月 14 日に M7.1 の地震が発生している（薩摩半島西方沖地震）。

今回の熊本地震活動と周辺の地震活動は南西諸島地域にも関係してくることから、§ 2. でも述べたように、これらの地域における地震波伝播シミュレーションと地震波再現性・構造モデルを検討することを追加テーマとして実施した。この研究内容は論文としてまとめて投稿した (Okamoto et al. 暫定受理)。

なおこの内容は中間報告書で詳しく報告したことから、本最終報告書では概略を述べる（このセクションは岡元・他 (2016 年地震学会発表) による）。

5.3.1 地震活動の概要

熊本地震活動は九州中部を縦断するように発生した (図 7)。ここは「別府島原地溝帯」と呼ばれ、南北方向に拡大（伸長）するような地殻変動が見られることで知られている（例えば [10] によると $6 \times 10^{-8} \text{ strain/year}$ の歪み速度である）。

さらにこの地溝帯を西側海域に延長した地域でも、図 7 に見られるような大きな地震活動が発生した。この活動は「沖縄トラフ」と呼ばれる地域

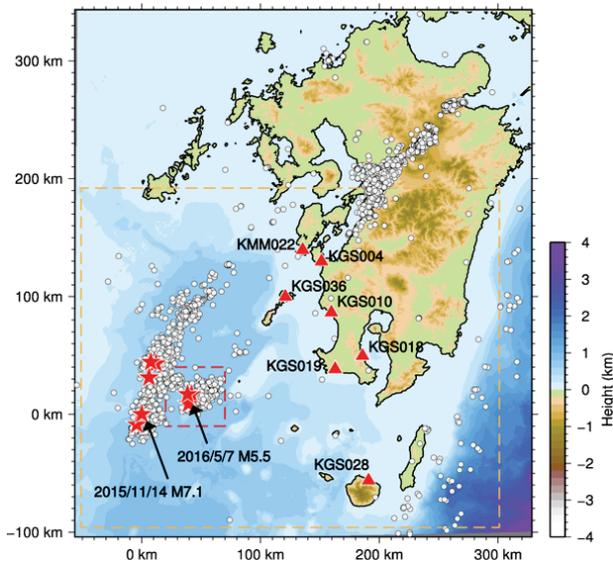


図 7 熊本地震活動と九州西方沖地震活動の図。M2 以上、深さ 30 km 以浅の地震の震央を白丸でプロットした。九州西方沖では M5 以上の地震のうち解析対象となるものをそれぞれ赤い星印でプロットした。震源データは気象庁による。

の北部に位置している。沖縄トラフも拡大方向の地殻変動が見られる地域であることから（北部の拡大速度は 10 mm/year と推定される [11]）、隣接する別府・島原地溝帯は沖縄トラフの陸域への延長ではないかとも考えられている [12, 10]。前述のように、この海域では 2015 年に M7.1 の地震が発生し（図 7）、地震に伴う津波も観測されている（中之島、0.3m）。このように薩摩半島西方沖も M7 程度の大地震や津波の発生域となり得る地域であることが明らかになってきたと言える。

5.3.2 地震波再現性

陸海統合 3 次元構造モデルは、海域を含む東経 128 度以東・北緯 30 度以北の九州地方に対して設定する（図 7 の橙色点線で囲んだ矩形）。浅部構造として陸上・海底地形モデル [14] と J-SHIS 深部地盤データ V2[8] とを利用し、コンラッド面・モホ面形状と下部地殻・マンツルの物性値は全国一次地下構造モデル（暫定版）[9] と、隣接地域での構造探査結果 [15] とを参考にして作成した。

この解析では各観測点に関するグリーンテンソル波形を地震波シミュレーションにより計算する。地震波シミュレーション手法は HOT-FDM[3] であり、本研究ではマルチ GPU 対応プログラム [1, 2] を利用して東工大 TSUBAME-2.5 によりシミュレーションを実施した。表 3 に計算パラメータを示した。

設定項目	利用したパラメータ
全格子サイズ	2880 × 3520 × 930
副領域サイズ	320 × 320 × 310
格子間隔	0.10 km
全領域サイズ	288 × 352 × 93 km
時間間隔	0.005 s
非弾性要素数 *	6
GPU 数	297
ステップ数	24000
計算時間 **	10850 s

表 3 九州西方沖の差分法シミュレーションのパラメータ。TSUBAME-2.5 を利用した。* メモリ変数の個数 ([16] の (3.136) 式の n)。** 計算時間は 14 ケースの平均値で、ファイル I/O の時間他を含む。

3 次元不均質構造のもとでは、地震波形は発震機構（モーメントテンソル）だけでなく震源の位置によっても大きく変化する。そこで計算したグリーンテンソル波形を用いて逆問題解析と格子探索とを組み合わせた手法 [17] により最適震源パラメータ（モーメントテンソル・震源時間関数・震源位置）を推定し、その最適パラメータを用いて波形の再現性を考察した。データとして K-NET の強震動波形データを利用した。

このようにして得られた最適点震源を用いて表面波を含めた波形全体を短周期側で計算すると、周期 7 秒程度の段階で波形残差が大きくなり、波形の再現性が低下してくることがわかる（図 8）。短周期表面波は表層付近の不均質構造に大きく影響されることから、この結果は表層付近の短波長不均質構造に改良の余地があることを示唆する。

このように、九州西方海域に関する現状の 3 次元構造モデルは周期 10 秒程度までの地震波に関する再現性は良好であるが、それ以下の周期帯では特に短周期の表面波で再現性が低下することが本研究で示された。このような傾向は東北沖の地震についても観察されており（[13] の §5.1.2）、現状の構造モデルの検討と改良の上で留意が必要であると考えられる。

5.4 東北沖の地球内部構造モデル

本課題では東北沖での地震波再現性の向上を目的として、地震波形データを用いた地球内部構造モデル改良というテーマを設定した。この改良に用いる逆問題手法では、構造パラメータの摂動による感度を表すアジョイント・カーネルを利用する（アジョイント・カーネルについては例えば平成 27

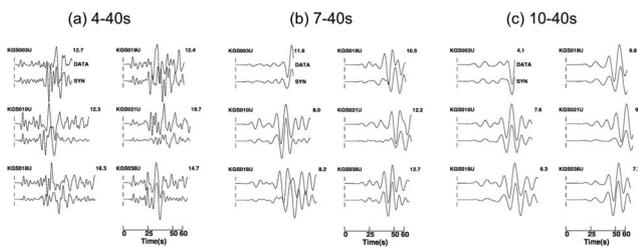


図 8 2016 年 5 月 7 日の地震の波形比較。初動が明瞭な観測点 (KGS003, KGS010, KGS018, KGS019, KGS021, KGS036) のデータのみについて、最適震源パラメータで計算波形を生成した。(a) 4-40 秒、(b) 7-40 秒、(c) 10-40 秒のバンドパスフィルターをそれぞれを適用した。規格化した波形残差は (a) 1.33、(b) 0.84、(c) 0.40 である。

設定項目	利用したパラメータ
全格子サイズ	①4864 × 3200 × 1200 (6 回) ②4800 × 3200 × 940 (23 回)
副領域サイズ	①256 × 320 × 600 ②320 × 320 × 470
格子間隔	0.15 km
全領域サイズ	①728 × 480 × 180 km ②720 × 480 × 141 km
時間間隔	0.0071429 s
非弾性要素数 *	3
GPU 数	①380, ②300
ステップ数	①31444~38094, ②38094
②の計算時間 **	16913 s

表 4 東北沖の差分法シミュレーションのパラメータ。TSUBAME-2.5 を利用した。* 表 3 を参照。**②の 23 ケースの平均計算時間で、ファイル I/O の時間他を含む。

年度最終報告書 [13] の § 5.1.5 を参照)。このカーネルを作成するためには各観測点から逆伝播させた波動場データが必要になる。そこで今年度は多くの観測点を対象とした多数回の大規模地震波伝播シミュレーションを実施して、摂動カーネル生成のための逆伝播計算結果を蓄積した (表 4 の②)。計算には東工大の TSUBAME-2.5 を利用した。計算パラメータは表 4 にまとめた。

そしてこれらの計算結果からアジョイント・カーネルを作成し、逆問題解析用のプログラムも作成して、1 観測点-1 震源のペアのみについて計算波形を用いた逆問題解析の試行を進めた。この試行では「観測」波形として計算波形を用いて、与えた構造パラメータをどの程度に推定できるかを検討している。今後は、このような試行で解の振る舞いの特徴を精査したうえで、複数観測点-複数震源の解析へと順次進めていく予定である。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

平成 28 年度前半には、南西諸島域での地震波再現性や地球内部構造モデルの検証・改良という本課題のテーマに関連して、平成 28 年 (2016 年) 4 月に発生した熊本地震活動と相前後して発生した九州西方沖の地震の解析という追加テーマの研究を実施した (§5.3 および本課題の中間報告書)。

平成 28 年度後半には課題申請時のテーマに沿って、南西諸島域での地球内部構造モデル検討のための大規模地震波シミュレーション (§5.1) と、地球の曲率の効果を取り入れる準球座標系スキームの研究 (§5.2)、および東北沖の構造モデル改良のための大規模地震波シミュレーション (§5.4) を実施した。そして、地球の曲率の効果を取り入れる準球座標系スキームの論文と、九州西方沖地震活動に関する論文を投稿した。なお東工大拠点では全資源の 97.5%、東大拠点では 86% を消費して、これらの研究に当てさせていただいた。

今後はまず、平成 28 年度に得られた地震波シミュレーション結果をもとにして、南西諸島域の地球内部構造モデル (とくに地震波の減衰構造モデル) の妥当性や改良の可能性を検討する。また準球座標系スキームを地震波・津波統合計算に組み込む可能性を継続して検討する。東北沖の構造モデル改良についても、逆問題解析を拡張して複数観測点-複数震源ペアのケースへ向けてデータを増やした検討を進めて行く予定である。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

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 model, *Earth, Planets and Space*, doi:10.1186/s40623-017-0651-1, 2017.

Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka, Takeshi Nakamura, and Tatsuhiko Hara, FDM Simulation of The 2016 West Off Kyushu, Japan, Earthquakes by Using Land-Ocean Unified 3D Structure Model, *Earth, Planets and Space*, 暫定受理*.

*英文校閲後に正式受理の予定。

(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

Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka, Takeshi Nakamura, and Tatsuhiko Hara, FDM Simulation of The 2016 West Off Satsuma Peninsula, Kyushu, Japan, Earthquakes by Using Land-Ocean Unified 3D Structure Model, *American Geophysical Union 2015 Fall Meeting*, Moscone Center, San Francisco, California, USA, 2016 年 12 月 16 日.

(4) 国内会議発表

岡元太郎・竹中博士・中村武史・青木尊之、大規模シミュレーションとアジョイントカーネルに基づく沈み込み帯での地震波伝播の考察、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、SSS28-P07、幕張メッセ国際会議場 (千葉市)、2016 年 5 月 23 日.

岡元太郎・竹中博士・中村武史、陸海統合 3 次元構造モデルにもとづく 2016 年薩摩半島西方沖地震のシミュレーション、日本地震学会秋季大会、S21-P05、名古屋国際会議場 (名古屋市)、2016 年 10 月 7 日.

(5) その他 (特許、プレス発表、著書等)
該当なし。

謝辞 防災科学技術研究所の強震動波形データ (K-NET) と F-net モーメントテンソル解、および気象庁震源データをそれぞれ利用させていただきました。岸本氏、防災科学技術研究所、地震調査研究推進本部からは構造モデルを提供いただきました。記して感謝いたします。

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] Nakamura, T., H. Takenaka, T. Okamoto, and Y. Kaneda, FDM Simulation of Seismic-Wave Propagation for an Aftershock of the 2009 Suruga Bay Earthquake: Effects of Ocean-Bottom Topography and Seawater Layer, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **102**, No. 6, 2420–2435, doi: 10.1785/0120110356, 2012.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 小松正直・竹中博士, 南西諸島における三次元地震波減衰トモグラフィ, 日本地震学会 2015 年秋季大会, S06-07, 2015 年 10 月 28 日 (神戸国際会議場、神戸市) .
- [7] JTOPO30v2—日本近海 30 秒グリッド水深データ第二版, 海洋情報研究センター, 2011.
- [8] Fujiwara H., Kawai S., Aoi S., Morikawa N., Senna H., AZUMA H., Ooi M., Hao K. X.-S., Hasegawa N., Maeda T., Iwaki A., Wakamatsu K., Imoto M., Okumura T., Matsuyama H., Narita A., A study on subsurface structure model for deep sedimentary layers of Japan for strong-motion evaluation, *Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, No.379, 2012.
- [9] 地震調査研究推進本部, 全国一次地下構造モデル (暫定版), http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/dat/, 2012.
- [10] Takayama, H., and A. Yoshida, Crustal deformation in Kyushu derived from GEONET data, *Journal of Geophysical Research*, **112**, B06413, doi:10.1029/2006JB004690, 2007.
- [11] Nishimura, S., M. Hashimoto, and M. Ando, A rigid block rotation model for the GPS derived velocity field along the Ryukyu arc, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **142**, 185–203, 2004.
- [12] 多田 堯, 沖縄トラフの拡大と九州地方の地殻変動, *地震*, 第 2 輯, **37**, 407–415, 1984.
- [13] 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 27 年度共同研究 最終報告書, 15–NA12, 2016.
- [14] Kisimoto, K., Combined bathymetric and topographic mesh data: Japan250m.grd, *Geological Survey of Japan, Open-file Report*, No. 353, 2000.
- [15] Iwasaki, T., N. Hirata, T. Kanazawa, J. Melles, K. Suyehiro, T. Urabe, L. Möller, J. Makris, and H. Shimamura, Crustal and upper mantle structure in the Ryukyu Island Arc deduced from deep seismic sounding, *Geophysical Journal International*, **102**, 631–651, 1990.
- [16] Moczo, P., J. Kristek, and M. Galis, The finite-difference modelling of earthquake motions, Cambridge University Press, 2014.
- [17] 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).