

jh170022-NAJ

## 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。今年度は次の研究を進めた。**[1] 南西諸島域の地球内部構造モデル (§ 5.1)** 南西諸島域を先島諸島周辺と奄美群島 - 沖縄諸島域周辺の二つの地域に分けて、地盤探査結果も踏まえて 3 次元地球内部構造モデルを作成した。そして先島諸島地域 (§ 5.1.1) と奄美群島 - 沖縄諸島域 (§ 5.1.2) のそれぞれを対象とした大規模地震波伝播シミュレーションを東大 FX10 により実施した。その結果、沖縄本島の沖では厚い堆積物のために波動伝播に著しい遅れが現れること、短周期側波形の特徴は計算波形によってある程度までは再現できること、などの知見を得ることができた。**[2] 東北沖の構造モデルの考察 (§ 5.2)** TSUBAME-2.5 および 3.0 による大規模地震波伝播シミュレーションの結果を用いた FAMI 解析により、東北沖の日本海溝で発生した小地震 (M~6) の最適地震パラメータを推定した。その最適パラメータのもとで観測地震波波形の再現性を検討した。その結果、現状の構造モデルでは周期 10 秒程度以下では再現性が低下することを確認した (§ 5.2.1)。また、境界面形状の摂動に関する波形の感度を表す積分カーネルを生成するための大規模シミュレーションも実施した (§ 5.2.2)。

### 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

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・理学院・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
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

日本列島は地球科学的に沈み込み帯として位置付けられ、海溝型の巨大地震が各地の海溝で発生する。特に 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甚大な地震・津波災害をもたらした。このような海溝型巨大地震の詳細な断層破壊過程を推定することや、強震動・津波の生成メカニズムを考察すること、そして得られた破壊過程モデルによる観測地震動の再現性を検討することが重要な課題となっている。これらは将来の海溝型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。

我々はこれらの課題に取り組むために食い違い格子 (図 1) を用いた時間領域差分法 (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[文献 1-3]。我々のプログラムには、不規則な固体・流体境界（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、我々が開発したスキーム[文献 4,5]によって取り入れている。

平成 29 年度には南西諸島の広域 3 次元構造モデルの構築と大規模地震波シミュレーションによる妥当性の検討、東北沖の構造モデルに関する考察としての波形再現性の検討や、地震動に大きい影響を持つ層境界形状の改良を検討する上で必要な大規模シミュレーションなどを実施した。

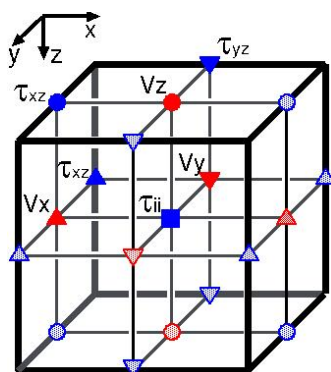


図 1 本研究で用いた食い違い格子の単位セルと変数の配置 [文献 1-3]。 $V_i$  は速度ベクトルの成分、 $\tau_{ij}$  は応力テンソルの成分を示す ( $i,j=x,y,z$ )。

### 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 300 GPU (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した。2017 年 8 月に導入された TSUBAME-3.0 でも 150 GPU の資源 (38 ノード) を利用したシミュレーションを実施した。ま

た東大の FX10 では 372 ノードの資源を利用した大規模シミュレーションを実施した。

### 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] **南西諸島域の地球内部構造モデル** 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た。

[2] **準デカルト座標系スキーム** 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」の研究を進めた。昨年度は東大 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[文献 6]。

[3] **九州西方沖地震活動の解析** 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 3 次元構造モデルを用いた場合、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。この成果は論文として出版した[文献 7]。

[4] **東北沖構造モデルの改良** 多数の大規模地震波シミュレーションにより摂動カーネルを作成して、東北沖の地球内部構造モデルを改良するための逆問題解析の検討を進めた。

### 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広域の地球内部構造モデルを構築し、大規模シミュレーションによる地震波（強震動）再現性

の検討を通して構造モデルの妥当性を考察することである。もう一つのテーマは、東北沖の日本海溝を対象領域として、地震波波形の再現性や構造モデル改良について考察することである。これらについて下記の研究を進めた。

[1] 先島諸島域の大規模シミュレーション (§ 5.1.1) 南西諸島域のうち、先島諸島を対象とした暫定構造モデルを作成し、大規模地震波シミュレーションを実施して観測波形と計算波形との比較検討を行った。[中間報告書で報告済み]

[2] 奄美群島-沖縄諸島域の大規模シミュレーション (§ 5.1.2) 南西諸島域のうち、奄美群島-沖縄諸島域を対象とした構造モデルを作成し、大規模地震波シミュレーションによるスナップショ

ットを用いた波動伝播の考察や、観測波形と計算波形との比較検討を行った。[中間報告以降の成果]

[3] 東北沖の浅い地震の FMT 解析 (§ 5.2.1) 東北沖の日本海溝で発生した小地震を対象として、観測地震波波形を計算波形がどの程度に再現できるかを検討した。さらに地震の震源位置と構造モデルとの整合性等を検討した。この成果は論文として投稿した (Okamoto et al. *EPS*, submitted.) [中間報告から継続した成果]

[4] 東北沖の構造モデル改良のための計算 (§ 5.4) 観測波形と計算波形の一致度を高めるためには構造モデルを改良する必要がある。今年度はとくに境界面形状の摂動に関する波形感度を検討するための大規模計算を実施した。[中間報告以降の成果]

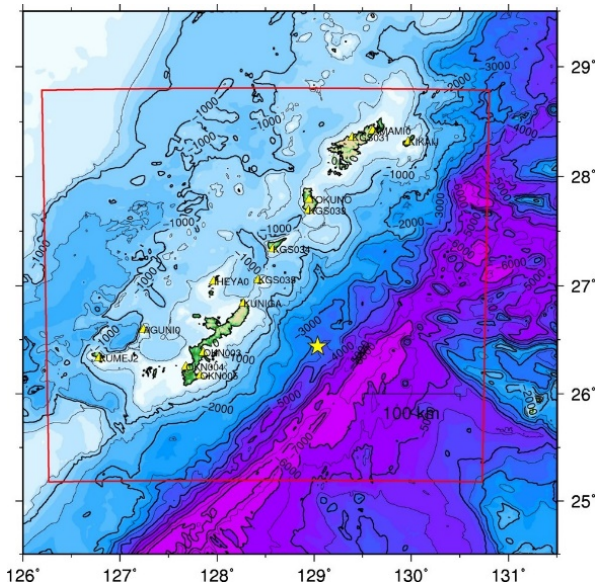


図 2 奄美群島-沖縄諸島域のシミュレーション範囲。赤線で囲まれた領域が計算領域。黄色い星印は対象地震の震央、黄色い三角は地震波観測点をそれぞれ示す。

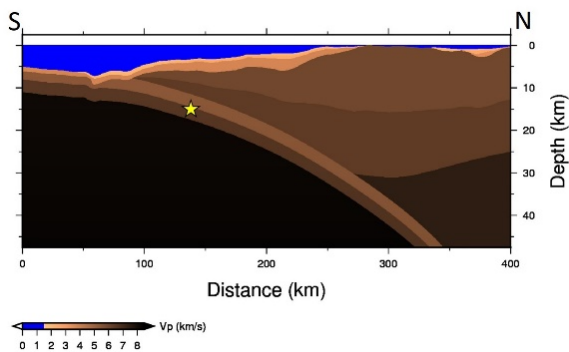


図 3 3次元地球内部構造モデルの断面の例。震源を通る南北方向 (N が北、S が南) の鉛直断面の P 波速度を描いたもの。黄色い星印は震源位置、青い領域は海水層を表す。

格子サイズ	4001×4501×501
格子間隔	0.1 km×0.1 km×0.1 km
領域サイズ	400 km×450 km×50 km
時間ステップ数	16001
時間間隔	0.005 s
非弾性要素数	3
ノード数	372
プロセス数	744
スレッド数	8
計算時間	2.56 h

表 1 奄美群島-沖縄諸島域シミュレーション (図 1) に用いた差分法計算 (HOT-FDM) のパラメータと計算時間。計算には東大 FX-10 を利用した。

緯度	26.4422°
経度	129.0337°
深さ	15 km
地震モーメント	$1.39 \times 10^{18}$ Nm
震源パルス幅	3.548 s
モーメントテンソル	F-net 解

表 2 奄美群島-沖縄諸島域シミュレーション (図 1) に用いた震源パラメータ。

### 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。そこで本課題ではこれまで継続して、南西諸島域を主な対象とした 3 次元構造モデルと、地震波・

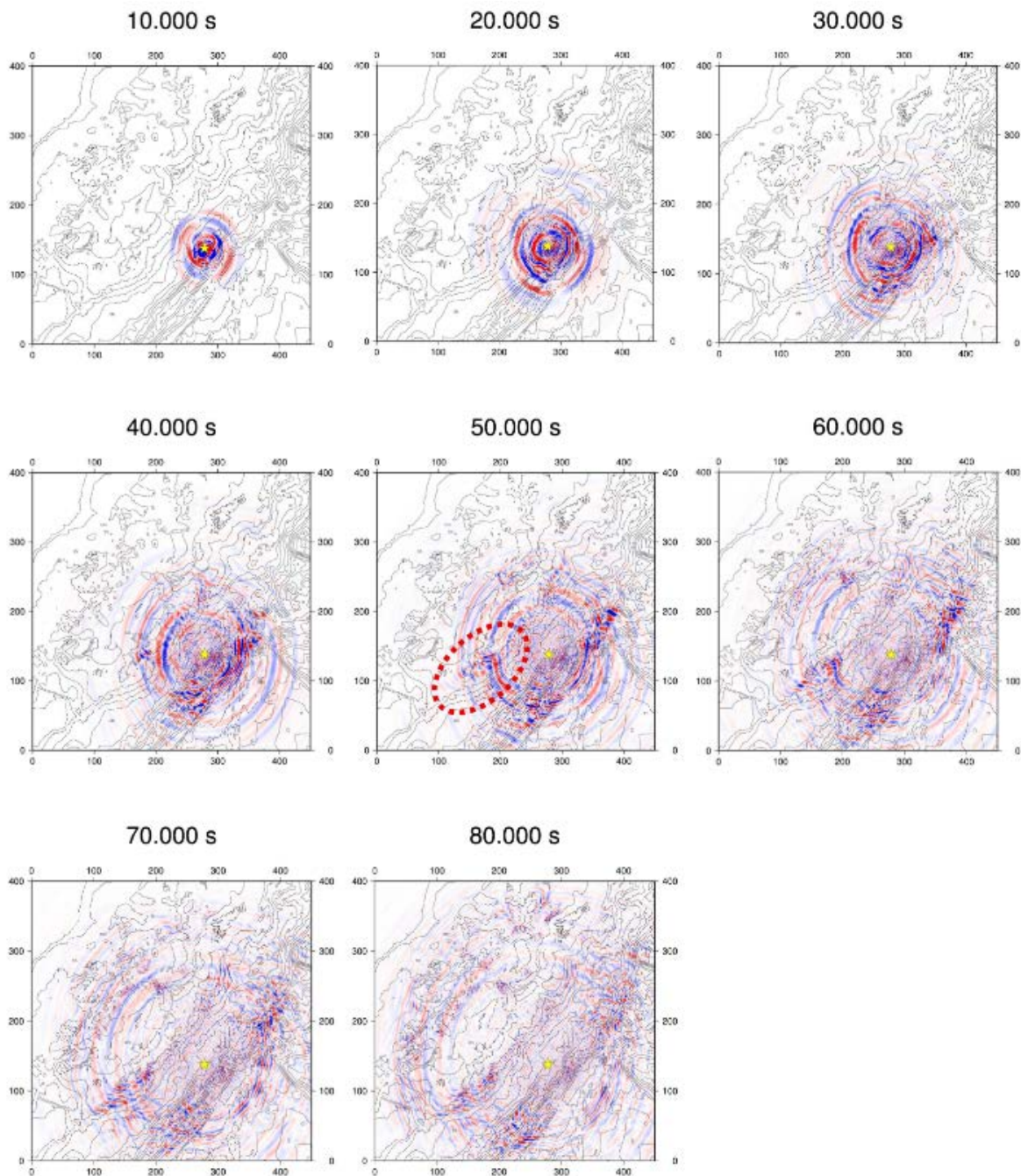


図 4 奄美群島 - 沖縄諸島にかけての地震波シミュレーションによる、陸上及び海底を伝播する地震波のスナップショット。星印は震央、標高（陸上及び海底地形）の等値線を黒線で示した。図示したのは上下動速度成分であり、海域では海底での地動速度を示す。地震発生後 10 秒後から 80 秒後まで、10 秒おきのスナップショットを示した。

津波シミュレーション手法の研究を進めてきた。これらは、地震動の再現性や津波発生・伝播の研究を進めるうえで重要な基盤となるものである。

### 5.1.1 先島諸島を対象としたシミュレーション

今年度前半では先島諸島を対象とした3次元速度構造モデルを作成し、地震波伝播の大規模シミュレーションを実施した。そして観測波形と計算波形を比較することにより、構造モデルの妥当性

や震源からの距離による波形の変化等を検討した。（中間報告書で報告済みのため詳細は割愛する。）

### 5.2.2 奄美群島-沖縄諸島域のシミュレーション

今年度後半は、南西諸島域のうち奄美群島-沖縄諸島域を対象とした広域の3次元構造モデルを作成し、大規模地震波シミュレーションを実施して、スナップショットを用いた波動伝播の考察や、観測波形と計算波形との比較検討を行った。

このモデルは図 1 に示した領域について、陸上地形（国土地理院 250 m メッシュデータ）と海底地形（JTOPO30v2 [文献 8]）とを用いて地形を設定し、J-SHIS 地盤モデル V2 [文献 9] と地盤探査結果とを用いて地盤構造を設定した。さらに OBS 探査の結果をもとにして地殻構造を設定した。また、減衰構造トモグラフィの結果 [文献 10] などを踏まえて 3 次元非弾性減衰モデルを導入した。このように、我々が設定した構造モデルは地形・海水層や 3 次元減衰構造を含めたものである (図 3)。

このシミュレーションの計算パラメータは表 1 に示した。シミュレーションは、我々が開発したスキームによる差分法 (HOT-FDM [文献 3]) を用いて、東京大学情報基盤センターの FX10 で MPI と openMP とを用いた並列計算により実施した。

計算結果と比較するための対象として、2004 年 7 月 22 日 18 時 45 分に発生した地震 ( $M_{JMA}6.1$ ) を用いた。この地震による地震動をシミュレートするための震源パラメータを表 2 に示す。なお震央 (緯度・経度) は気象庁決定値を採用したが、震源が 3 次元構造モデルの沈み込むフィリピン海プレート内に入るように、深さを気象庁決定値の 33.51 km から 15 km に変更した。

このシミュレーションによって計算した波動場のスナップショットを図 4 に示す。琉球海溝の深い海底 (海水) から陸地 (固体) へと、地形と構造が急変するのに応じて、波動場の伝播に非等方向性が現れていることがわかる。さらに地震波が伝播する途中の、沖縄本島南東側で波の伝播が急激に遅くなっていることが観察される (50 秒後のスナップショットの破線楕円の部分)。これは、表層の厚い堆積物層の影響であると考えられる。

次に、得られた計算波形と実際の観測波形との比較例を図 5 に示す。浅い構造の影響を検討するために、この比較ではやや短周期側 (周期 4-10 秒) のバンドパスフィルターをかけた。AMAMIO、KIKAIJ、TOKUNO、KGS034 などのいくつかの観測点の上下動成分 (UD) では、観測波形に現れている主要なパケットの到来時間と振幅が、ある程度は計算波形によって再現できている。水平成分

でもいくつか再現性の良い観測点は見出される。つまり今回仮定した構造モデルによって、これらの観測されたパケットの群速度をある程度まで再現できることを示す。しかし各波形の位相 (波の山谷) までを再現するのは現時点では難しいことも、波形の比較からわかる。また、沖縄本島の観測点 (OKN003~OKN005) では観測波形の短周期成分が弱くなって長周期側の振動が卓越しているが、計算波形ではその特徴が再現できていない。これは沖縄本島および周辺の堆積物層の減衰構造を改良する (減衰を強くする) 必要があることを示唆している。今回の大規模シミュレーションで見出されたこれらの点を今後さらに検討していく必要がある。

## 5.2 東北沖の構造モデルの検討

### 5.2.1 東北沖の浅い地震の FAMT 解析

地震の断層すべり量分布は、断層周辺の応力や強度・物性などを反映した重要な情報である。その推定には地震波波形データが一般に用いられる。しかし海域の地震解析では観測点分布に大きな偏りがあり、しかも地震波速度の遅い海水層や厚い堆積物層などの不均質構造の影響が波形に強く現れることが知られている [文献 11, 12]。

そこで我々は FAMT (First-motion Augmented Moment Tensor) 解析を提案した [文献 7]。FAMT 解析では長周期フィルターをかけた全体波形に加えて、実体波から得られる情報を強化するために、短周期フィルターをかけた初動部分のみの波形も追加する。この 2 種類のデータのもとで逆問題を解いてモーメントテンソルと震源時間関数を求める。さらに時空間格子探索により、発震時補正と最適震源位置も推定する。このようにして最適震源パラメータを決定したうえで、構造モデルの妥当性を、波形の再現性を通して考察する。

今年度は、2011 年東北地方太平洋沖地震 ( $M9$ ) の震源域である東北沖で発生した 2 個の小地震に FAMT 解析を適用し、学会発表 (岡元・他、地震学会、2017) と論文投稿を行った (Okamoto et al., EPS, submitted)。ここではその概要を紹介する。

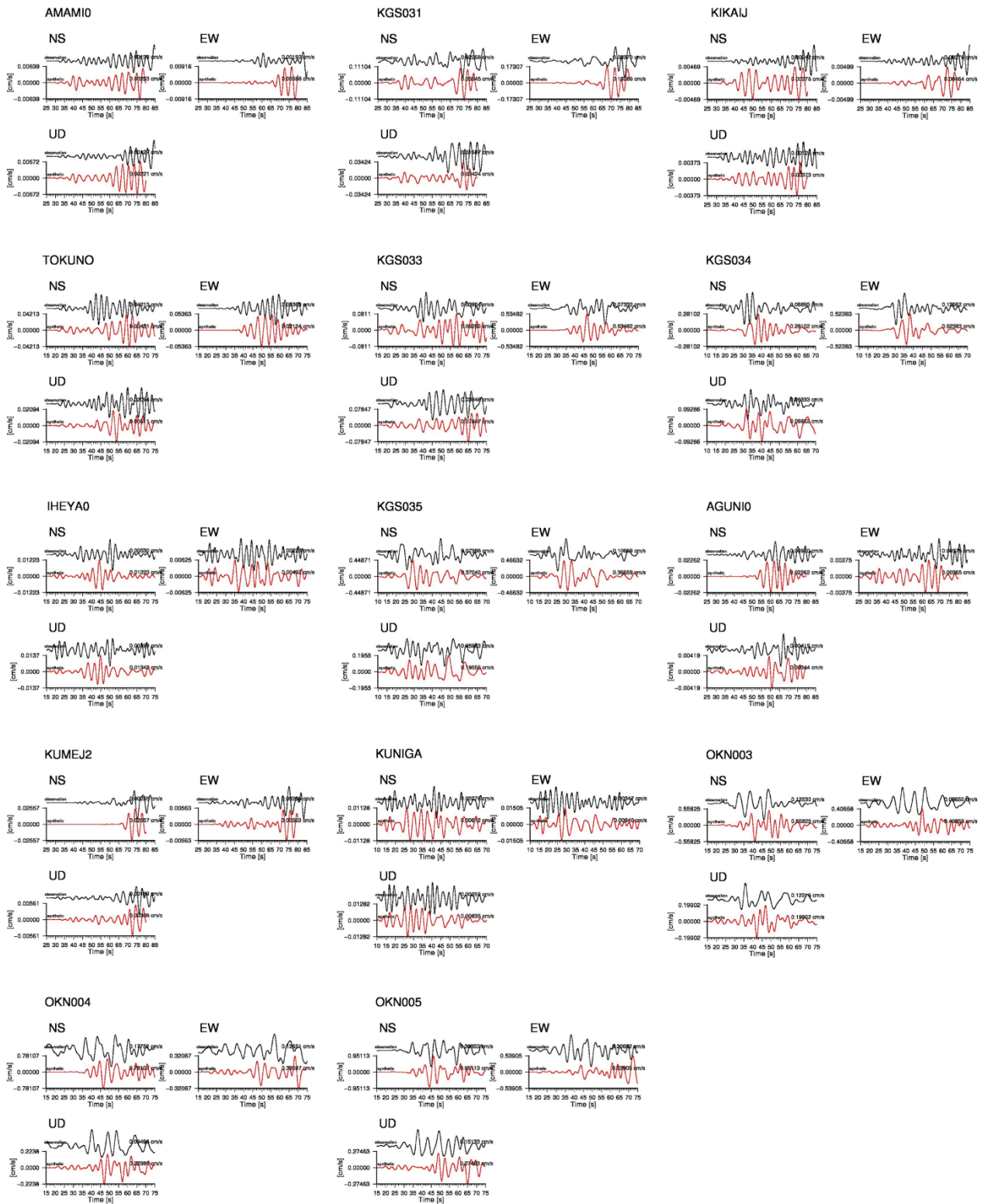


図 5 図 1 に示した 14 観測点（北から AMAMI0~OKN005）での 3 成分観測波形（地動速度）と、対応する計算波形の比較。黒色が観測波形、赤色が計算波形であり、NS:南北動成分、EW:東西動成分、UD:上下動成分、をそれぞれ示す。波形には周期 4 - 10 秒のバンドパスフィルタをかけた。

まず解析に用いるグリーンテンソル波形は、東工大 TSUBAME-2.5 の 300 GPU (100 ノード、格子サイズ 4800×3200×940)、および TSUBAME-3.0 の 150 GPU (38 ノード、格子サイズ 4800×3200×

1160) をそれぞれ用いた大規模シミュレーションにより生成した。これらのグリーンテンソル波形を用いた FAMT 解析による最適震源位置は、2 つの地震でどちらもプレート境界近傍に定まった。

この位置は、これらの地震のプレート境界型発震機構と調和する。一方、長周期データのみを用いた他の解析結果（GCMT 解、JMA-CMT 解、F-net 解等）では、震源位置はプレート境界から離れた場所に推定された。この結果は、3次元構造モデルの中で自己無矛盾な震源推定値を得るためには FAMT 解析のような手法が必要になることを示す。

そして計算波形の再現性を検討するために、この FAMT 解析によって得られた最適震源パラメータを用いて理論波形を生成し、複数の周期帯について観測波形と比較した。その結果、現状の構造モデルのもとでは、波形全体で振幅と位相とを再現できるのは周期 10 秒程度以上であると結論できた。これは九州西方海域の地震解析結果[文献 7]と同様の結果である。この結果から、短周期（ $\leq 10$  秒）波形の再現性を高めるためには構造モデルの改良が必要であることが確認された。

### 5.2.2 東北沖の構造モデル改良のための計算

上述の解析結果を受けて、構造モデルを系統的に改良する手法の検討も進めた。本研究ではアジョイントの方法[文献 13]によって、モデルパラメータの摂動に関する波形の感度を表す積分カーネル（Fréchet 微分）を計算する。この方法では、地震の震源から伝播するフォワード波動場と、観測点に力源を置いたときのアジョイント波動場の両方をシミュレーションによって計算する。

今年度は境界面形状の摂動に関する感度カーネルを求めるために、TSUBAME-3.0 の 150 GPU（38 ノード、格子サイズ 4800×3200×1160、格子間隔 0.15 km）を用いる大規模シミュレーションを実施した（フォワード波動場×1、アジョイント波動場×3）。この積分カーネルを求めるためには構造境界面近傍の波動場データを必要とすることから、対象領域を限定した上でその領域内のすべての格子点の波動場変数を出力した。これらの出力結果にもとづいて感度カーネルに関する考察を継続する予定である。

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

### [1] 南西諸島域のシミュレーション (§ 5.1)

南西諸島域を先島諸島周辺と奄美群島 - 沖縄諸島域周辺の二つの地域に分けて、地盤探査結果や減衰構造トモグラフィの結果も踏まえて、地形や海水層を含めた 3次元地球内部構造モデルを作成した。そして、今年度前半に先島諸島地域を (§ 5.1.1)、後半に奄美群島-沖縄諸島域地域を (§ 5.1.2)、それぞれ対象とした大規模地震波伝播シミュレーションを実施した。その結果を検討し、設定した構造モデルのもとでの波動伝播状況の特徴や波形再現性についての知見を得ることができた。今後は微動探査結果などをもとにして地盤構造の改善をさらに進めて、波形再現性の向上につながるかの検討を継続する。

### [2] 東北沖の浅い地震の FAMT 解析 (§ 5.2)

東北沖の日本海溝で発生した 2つの小地震（M $\sim$ 6）を対象として TSUBAME-2.5 での大規模地震波伝播シミュレーションを多数回実施した。そして構造モデル改良の前段階として、FAMT 解析を用いて観測地震波波形の特徴を計算波形が再現できるかどうかを検討した。その結果、現状の構造モデルでは周期 10 秒程度以下では観測波形の特徴に関する再現性が低下することを確認した。これらの成果は論文として投稿した（[Okamoto et al., EPS, submitted](#)）。また、構造モデルを改変した場合の波形への効果を表す感度カーネルを生成するための大規模シミュレーションも実施した。

なお東大 FX10 では配分資源のほぼ全て（97%）を消費するなど、全体としておおむね順調に研究が進展した。

## 7. 研究成果リスト

### (1) 学術論文

[Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka, Takeshi Nakamura,](#)

Evaluation of accuracy of synthetic waveforms for subduction-zone earthquakes by using a land-ocean unified 3D structure model, *Earth, Planets and Space*, submitted. (投稿中)

## (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

該当なし。

## (4) 国内会議発表

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日本海溝の浅い地震の FMT 解析、日本地震学会 2017 年度秋季大会、S01-P05、かごしま県民交流センター（鹿児島市）、2017 年 10 月 26 日

岡元太郎、竹中博士、中村武史、東北沖の陸海統合 3 次元構造モデルに基づくアジョイントカーネルの計算と波形インバージョンによる構造モデル改良の考察、日本地球惑星科学連合 2018 年大会、SSS10-P13、幕張メッセ国際会議場・国際展示場（千葉市）、2018 年 5 月 24 日（発表予定）

## (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] 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] 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*, **69**:67, doi:10.1186/s40623-017-0651-1, 2017.
- [7] 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*, **69**:88, doi:10.1186/s40623-017-0672-9, 2017.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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）。
- [11] Taro Okamoto, Full waveform moment tensor inversion by reciprocal finite difference Green's function, *Earth Planets and Space*, **54**, 715-720, 2002.
- [12] Takeshi Nakamura, Hiroshi Takenaka, Taro Okamoto, Michihiro Ohori, and Seiji Tsuboi, Long-period ocean-bottom motions in the source areas of large subduction earthquakes, *Scientific Reports*, **5**:16648, doi:10.1038/srep16648, 2015.
- [13] Toshiro Tanimoto and Taro Okamoto, 2014. The Millikan shaking experiments and high-frequency seismic wave propagation in Southern California, *Geophysical Journal International*, **198**, 1081-1095, doi:10.1093/gji/ggu189.