

大規模地震波シミュレーションによる沈み込み帯の波形トモグラフィー：2011年東北沖地震震源域と南西諸島域

岡元太郎（東京工業大学）

概要

東北沖パート (§ 5.1) では、2011年東北地方太平洋沖地震震源域の全波形トモグラフィーに関する海溝付近の観測点カバレッジを向上させるために、海底地震計データの本格的な導入の可能性について検討を行なった。まず ① 海底における地動を表現するグリーンテンソル波形を、固体・流体境界条件を考慮した HOT-FDM を用いて生成した。この地震波シミュレーションには TSUBAME-3.0 を利用した。② 23 観測点の海底地震計データの品質を慎重に検討してデータ選択を行なった。③ 海底地震計データを追加した FAMT 解析を実施して結果を検討し、観測波形の鉛直成分だけではなく水平動成分も良好に再現できること、最適震源位置やモーメントテンソルは陸上データのみを利用した場合と調和的であること、などの結果を得た。これらの結果から、海底地震計データを全波形トモグラフィ解析に追加できる見通しが立てられた。南西諸島域パート (§ 5.2) では、①南西諸島前弧域の最新の反射法探査測線で地盤構造を補完し、琉球海溝に沿った地盤の新しいモデルを作成した。②その新モデルを従来の構造モデルに組み込んで、名古屋大学の「不老」スーパーコンピュータ Type-I サブシステムによる大規模計算結果を用いた地震波伝播のテスト計算を実施し、地盤モデルの違いによる地震波伝播の違いを検討した。③南大東島観測点で記録された観測波形のモデリングを実施して、新モデルにより波形再現性が向上することを確認した。この結果により、新しいモデルによって奄美群島・沖縄諸島の観測点だけを使う場合よりも観測点配置を改善できる可能性を示せた。

1 共同研究に関する情報

1.1 共同研究を実施した拠点名

- 東京工業大学 学術国際情報センター
- 名古屋大学 情報基盤センター

1.2 課題分野

- 大規模計算科学課題分野

1.3 共同研究分野 (HPCI 資源利用課題のみ)

- 超大規模数値計算系応用分野

1.4 参加研究者の役割分担

岡元太郎（東京工業大学・理学院）	研究代表者・TSUBAME 3.0 での地震波計算とトモグラフィー解析
竹中博士（岡山大学・学術研究院自然科学学域）	副代表者・不老 (Type I) での地震波計算と構造モデルの検討
青木尊之（東京工業大学・学術国際情報センター）	GPU 計算最適化・大規模並列化・可視化への助言
小松正直（岡山学院大学・人間生活学部）	不老 (TypeI) での地震波計算と構造モデルの検討
渡邊禎貢（岡山大学・自然科学研究科）	不老 (TypeI) での地震波計算と構造モデルの検討

2 研究の目的と意義

本継続課題では大規模地震波シミュレーションを用いた全波形トモグラフィーによって沈み込み帯の3次元不均質構造モデルを改良する研究を行う。本課題の最終目標は、改良した3次元構造モデルによって短周期の波形再現性を向上させて震源パラメータや破壊過程の解析を高精度化し、地震発生場と地球内部構造との相関関係を探る研究を短波長域に拡張することである。本課題の対象領域は2011年東北地方太平洋沖地震（以下「東北沖地震」）の震源域と南西諸島域の2つとする。今年度のテーマは次のようになる。①東北沖地震震源域：昨年度までの陸上観測点データを用いた全波形トモグラフィーでは、海溝近傍の分解能を上げにくいことがわかってきた。そこで今年度は海底地震計データを本格的に導入して、データ再現性や解析結果の品質に関する検討を行った。②南西諸島域：昨年度までの研究で、海溝近傍から海溝外側にかけての地盤構造モデルを改良する必要性が明らかになった。そこで今年度は構造モデルの改良と、波形計算による検討を進めた。

3 当拠点公募型研究として実施した意義

プレートの沈み込み帯は、固体と流体（海水層）が不規則境界面（海底地形）で接しており、さらに不規則厚みの堆積物層や沈み込む海洋プレートなどの存在によって強い3次元不均質構造になっている。本研究では、この地域を伝播する地震波波形を観測データとして、観測データと計算波形との残差が小さくなるような3次元速度構造モデルを推定する。そのため不均質構造によって地震波が受ける伝播経路の屈曲や散乱などの効果を考慮した地震波伝播シミュレーションが必要不可欠である。そして本研究

では最短で周期数秒程度の波動場を対象とすることから、地震波シミュレーションの格子間隔は100 - 200 m程度となる。具体的には、東京工業大学のTSUBAME-3.0での代表的な計算パラメータは格子間隔：0.15 km、格子サイズ：4896 × 3360 × 800、時間ステップ：35000 (250 s)、使用GPU：126基 (32ノード)、計算時間：約1時間、という規模であり、名古屋大学のFX1000では最大で格子間隔：約0.20 km、格子サイズ：2201 × 5501 × 1001、時間ステップ：60001 (600 s)、使用ノード数：432、計算時間：約2時間という規模である。これらの大規模計算を行うために、本公募の共同研究として実施する必要がある。

本課題で得られる震源位置・震源メカニズムなどの震源パラメータと、最終目標としている改良された地球内部構造モデルは、地震発生域における物質強度・断層帯等のプレート内部微細構造・プレートの変形速度、などのプレート・テクトニクスに基づいた考察に新たな材料をもたらすと期待している。本課題で得られる知見をもとに、地震災害をもたらす強地震動の生成における3次元不均質構造の効果について地震工学や防災科学と関連させて考察することも可能となる。このように、本課題は地震の震源物理にとどまらず、様々な分野の知見を総合した考察に繋がるものである。

4 前年度までに得られた研究成果の概要

前年度は、東北沖パートでは東京工業大学のTSUBAME-3.0のGPUを利用した大規模計算結果をもとにして、①地震個数を増やすための追加FAMT解析および地震波シミュレーションと、②逆問題解析の性質を理解するための分解能行列の検討を行った（前年度報告書§5.1.1）。その結果、分解能が海溝近傍では低

下することが見出されたため海底地震計データを追加することとした。そして③海底地震計データを加えた試験的な FAMT 解析を行ない、海底地震計の波形データが良好に再現できることを確認した（前年度 § 5.1.2）。南西諸島域パートでは、名古屋大学の「不老」スーパーコンピュータ Type-I サブシステムによる大規模計算結果によって、①トカラ列島群発地震解析のためのグリーンテンソル波形計算を多数の震源候補点に対して実施した。そして②対象領域の地震について FAMT 解析を実施して、少数で遠方の観測点だけの場合でも良好な結果が得られることを確認できた（前年度 § 5.2）。

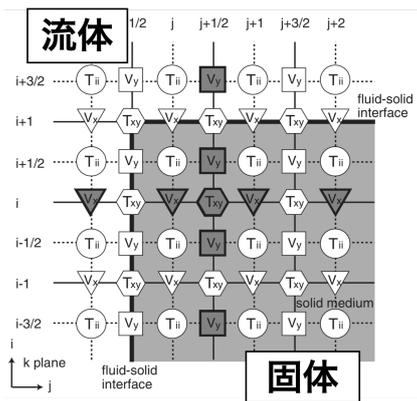


図 1 HOT-FDM の格子点配置 (Nakamura et al. BSSA 2012)。固体-流体境界面に剪断応力成分の格子点（六角形で表示した点）を配置する。

5 今年度の研究成果の詳細

ここでは東北沖を対象としたパートと、南西諸島を対象としたパートに分けて記載する。

5.1 東北沖：海底地震計データを用いた解析

研究の背景 これまでの研究によって、陸上観測点のデータのみを利用した場合には、陸上の観測網から遠く離れた日本海溝の近傍におけるトモグラフィの解像度が相対的に低下していることが見出された（2023 年度 JHPCN 課題）。

この地域の解像度を高めるためには、海底地震計から得られたデータを波形トモグラフィ解析に組み込むことによって海溝近傍領域の観測点カバレッジを向上させることが不可欠であると考えられる。そこで本研究では東北沖の日本海溝に設置された海底地震計観測網の多数点での波形記録をモデル化することを目的とする。

FAMT 解析 本研究の波形トモグラフィでは自然地震の詳細な震源パラメータを用いる。その推定には我々が提案した FAMT 解析 (Okamoto et al. EPS 2017, 2018) を利用する。FAMT 解析では、短周期 (4–40 秒) の P 波初動波形と長周期 (10–40 秒) の全波形を同時に使用することによって、P 波の到達時刻に関する情報が強化され、それに伴い震源位置の精度や震源時間関数が向上する。

表 1 東北沖領域の計算パラメータ

全格子サイズ	4896 × 3360 × 800
副領域サイズ	544 × 480 × 400
格子間隔	150 m
時間ステップ数	35000
時間間隔	0.007143 s
ノード数	32
GPU 数	126
1 回あたり計算時間	3902 s (平均値)

海底に対応した HOT-FDM FAMT 解析では海底に設置した地震計について、陸上地形・海底地形・海水層の効果を含めたグリーンテンソル波形が必要となる。このグリーンテンソル波形は、我々が開発した陸海統合 3 次元差分法 (HOT-FDM: Nakamura et al. BSSA 2012) を用いた大規模地震波伝播シミュレーションによって計算する。この手法では固体・流体境界である海底形状を差分法格子によって近似する。その際、応力テンソルの剪断成分 ($\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$) が固体・流体境界面に位置する

ように境界面を階段状に設定する。この配置によって空間 2 次精度で差分化した運動方程式のもとで固体・流体境界面での境界条件が 1 次精度で自動的に満たされる（岡元・竹中、地震、2005; 中村・他、地震、2011; 図 1）。格子点をこのように配置しない場合には境界条件が満たされず異常な波動が現れるので注意が必要である。計算精度を維持するために、固体・流体境界面以外の格子点では空間 4 次精度で差分化した運動方程式を用いる。

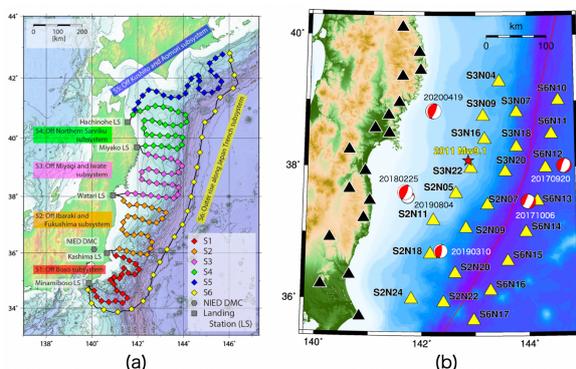


図 2 日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)。(a) S-net 全体のネットワーク (Aoi et al., EPS 2020)。(b) 本課題の対象領域。黄色の三角形で示された 23 ヶ所の S-net 観測点の波形データを使用した。図には Global CMT 解 (Ekström et al., PEPI 2012)、および本研究で使用した陸上観測点 (KiK-net および F-net、黒い三角形) を示した。

また、海底地震計のためのグリーンテンソル波形（対象領域の任意の場所で発生した単位地震に対する該当観測点で記録される地震波波形）を計算するために、相反関係を使って海底面の観測点位置に力源 (single force) を置いたときの波動伝播をシミュレートする。この際、境界面に垂直な方向の力源は境界面に位置する法線速度成分の運動方程式に追加される。境界面に平行な方向の力源は、境界から半格子間隔だけ内部 (固体側) にある接線速度成分の方程式に追加する。これは (流体の粘性を無視する近似のもと) 固体・流体境界面では境界面の接線方向変位に不連続が発生するためである。

東北沖パートでは、これらのグリーンテンソル波形を計算するために GPU 対応の HOT-FDM (Okamoto et al. 2013) を用いた。この方法では GPU 対応の各種の最適化を施したほか、上記の各格子点が空間 2 次精度と 4 次精度のどちらになるかをあらかじめチェックしてフラグをつけておき、計算ループでの計算式使い分けが速やかに実行されるようにしている。

海底地震計観測網 (S-net) 日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) は、2017 年 3 月に建設が完了した (Aoi et al. EPS 2020; 図 2a)。150 の観測点が光ケーブルで接続されており、各観測点には加速度計・速度地震計・圧力計が装備されている。本研究では、対象地域である 2011 年東北沖地震の震源域にある 23 個の観測点の加速度計記録を使用した (図 2b 参照)。

S-net の加速度計が固定されている海底ケーブルについては、地震動に伴ってケーブル自体が若干の回転をするなど、地震動とは異なる動きが発生する可能性がある (Nakamura et al. GJI 2019; Hayashimoto, et al. JSVE 2023)。また多くの海底観測点が軟弱地盤 (堆積物) の上に敷設されている。これらの条件のために海底観測点の波形データ利用では慎重な検討が必要となる。

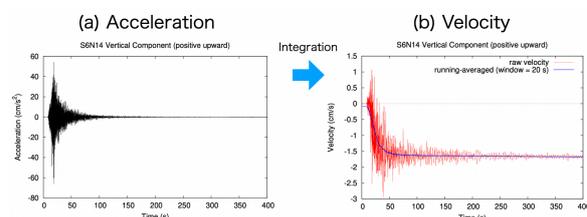


図 3 2017 年 10 月 6 日のアウターライズ地震 (図 2) について S6N14 観測点 (図 2) での海底面での上下動成分加速度波形と、それを積分した地動速度波形。

そこで今年度はデータ選択について着目しながら震源パラメータ解析を進めた。まず、S-net センサーはケーブル方向に固定されている

ので、その姿勢角を評価して原記録波形を回転し垂直および水平成分加速度波形に復元する。この際、地震動の前後で姿勢角がほぼ変化していないことなどを独自にチェックしたうえで、Takagi et al. (2019) の姿勢角報告値を用いて回転した。さらに FAMT 解析では速度波形を使用するため、加速度波形を時間積分する必要がある。しかし震源に近い観測点では速度波形に異常なオフセットが現れることがある(図 3)。全ての波形をチェックして、このようなオフセットが現れている波形は除外した。

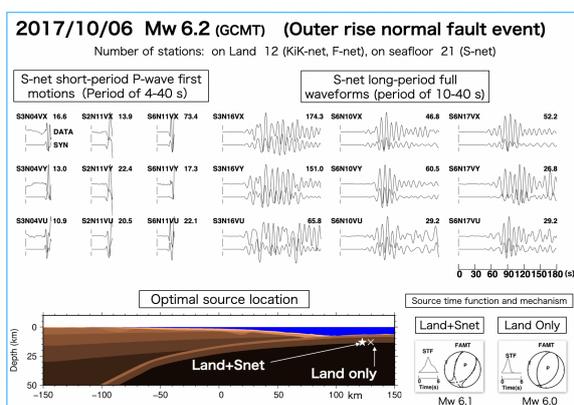


図 4 2017 年 10 月 6 日のアウターライズ地震に関する FAMT 解析結果のまとめ。

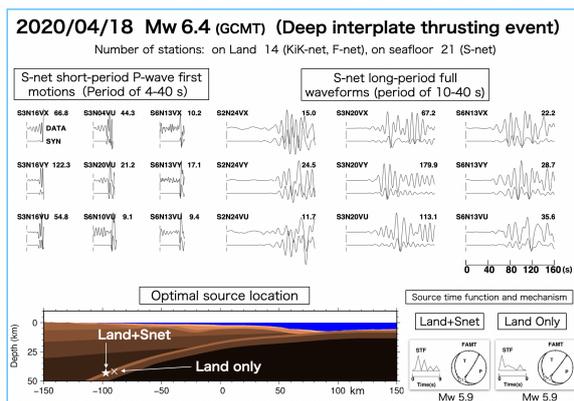


図 5 2020 年 4 月 18 日のやや深い地震に関する FAMT 解析結果のまとめ。

S-net データを加えた FAMT 解析 陸上データと多数の海底データを同時に利用した FAMT 解析によって得られた海底地震計の波形モデリング結果の例を図 4 に示す。図 4 は

海溝外側のアウターライズで発生した地震の例である。これは観測網の中で発生したやや大きめの規模の地震であり、広い範囲にわたって比較的良好的な波形が観測された。そして解析の結果、多くの観測点で 3 次元構造モデルと最適な震源パラメータに基づく計算波形により観測波形の特徴を概ね再現できることが見出された(図 4)。この再現性は垂直成分 (U) だけでなく、水平成分 (X および Y) でも顕著である。また陸上データのみを用いた場合と、陸上および S-net データを併用した場合の震源位置には若干の違いがある。しかし、これは震源断層の規模 (約 20km) の範囲に両者がほぼ収まるとみなされる(図 4 の断面図)。モーメントテンソルも同様に両者でほぼ一致している(図 4 の右下角の図)。陸寄りのやや深い位置で発生した地震でも、同様の特徴を示す結果が得られた(図 5)。

これらから、適切に選択した多数の海底地震計 (S-net) データが FAMT 解析に利用可能であることを確認できた。同時に、S-net 導入前の陸上観測網データのみを用いた FAMT 解析結果も、震源時間関数には若干の差異はあるものの、信頼できるものであることが示された。

表 2 南西諸島域のシミュレーション

	地震 (1)	南大東島 加振
格子サイズ	2001 × 2701 × 401	2001 × 2701 × 1001
格子間隔	200 m	200 m
時間間隔	0.01 s	0.01 s
時間ステップ数	20001	60001
計算時間	約 19 分	約 101 分

5.2 南西諸島域：構造モデルの構築

構造モデル構築 今年度はまず、南西諸島南弧域の付加体を含む堆積層のモデルを構築し、

付加体を伝播する地震波のテスト計算を行った。これには、南西諸島の地盤モデルとして Ver4 まで公開されている防災科学技術研究所の「J-SHIS モデル」では、南西諸島域の海溝沿いの領域で付加体を含む堆積層のモデル化が不十分であると考えられることが背景にある。そこで本研究では最新の反射法探査測線で推定された地盤構造を補間することで、琉球海溝に沿った地盤の厚さモデルを作成した(図 6)。地盤の各層の厚さは J-SHIS モデルの層厚の比を基にした。

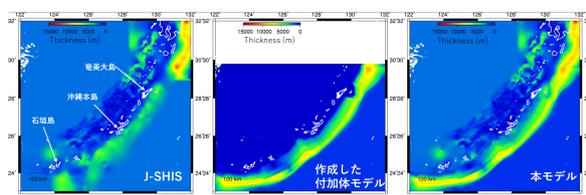


図 6 左図：J-SHIS モデルによる地盤の厚さ、中図：今回作成した付加体を含む厚さモデル、右図：両者を結合したモデル。

波形計算 (1) この琉球海溝に沿った新たな地盤の厚さモデルによる波動伝播を検討するために、既存の 3 次元構造モデル (小松 博士論文 2018) にこのモデルを組み込んで 2 種類の地震波伝播シミュレーションを行った。一つ目は 2016 年 7 月に沖縄本島沖で発生した Mw5.1 の地震 (北緯 26.532 度、東経 128.771 度、深さ 20km ; 小松・他 (2023) で推定) の波動伝播を粗い格子で計算したものである (図 7、表 2 の地震 (1))。比較のために従来の構造モデル (小松 博士論文 2018) による計算も行った。その結果、南北を横断する A-A' における鉛直断面上を伝播する地震波は地盤モデルの違いにより、その様相が異なることが確認された。二つ目のシミュレーションでは南大東島の気象庁観測点 MINAM2 の位置に Z (鉛直下向き) 方向に加振する力源を置き、付加体を通過するグリーン関数波形を計算した (図 8、表 2 の南大東島加振)。得られた F-net の 3 観測点にお

ける Z 成分の波形を図 8 に示す。特に発震後 100 秒以降のフェーズが従来モデルによるものと異なることが分かる。

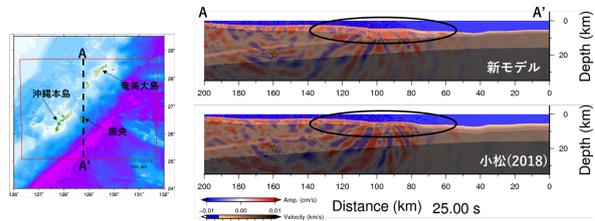


図 7 左図：計算領域 (赤線で囲まれた範囲)。破線 A-A' は右図に示した鉛直断面の位置を示す。右図：地下構造の鉛直断面と発震 25 秒後の粒子速度のスナップショット。黒楕円で囲まれた領域は地盤の厚さが特に異なる箇所。

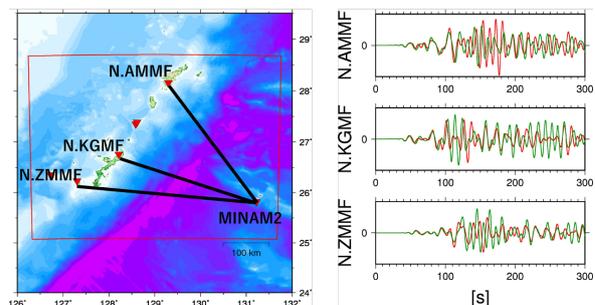


図 8 南大東島観測点位置を Z (鉛直下向き) に加振して生成したグリーン関数の Z 成分の計算波形 (周期帯は 10~40 秒)。赤線が本研究の新モデルで計算された波形、緑線は従来モデル (小松 博士論文 2018) によるモデルで計算された波形。

表 3 実地震のシミュレーション (2)

格子サイズ	4001 × 5401 × 801
格子間隔	100 m
時間間隔	0.005 s
時間ステップ数	40001
計算時間	約 94 分

波形計算 (2) さらに格子間隔を細かくして 2016 年 7 月に沖縄本島沖で発生した Mw5.1 の地震について再計算を行い (図 9、表 3)、観測波形と比較した。比較に当たっては、特に南大東島での波形に着目する。なぜなら南大東島観測点は琉球海溝を挟んで奄美群島・沖縄諸島とは反対側にあり、この観測点のデータを有効

に使えば奄美群島・沖縄諸島に偏った観測点配置の改善につながるためである。

そこで震源から背弧側を伝播した地震波が到来する観測点 N.AMMF (F-net 奄美大島) と、付加体を含む前弧側を伝播した波形が到来する観測点 MINAM2 (JMA 南大東島) での波形を比較した (図 10)。その結果、MINAM2 (JMA 南大東島) の理論波形の違いが顕著であることが明らかになった。特に EW 成分について新しいモデルをもとにして計算した理論波形では、従来モデルによるものと比べて観測波形の特徴の再現性が大きく向上したことがわかる。これは本研究のモデル改良方針が妥当であったことを示しており、今後の展開を期待できる。

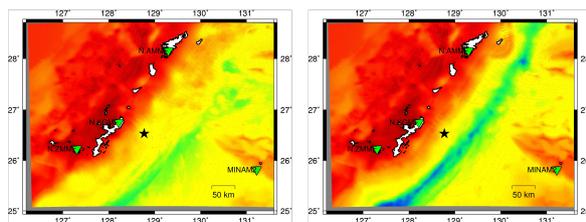


図 9 実地震の計算に用いたモデル。左図：従来モデル (小松 2018) での地盤下面 (地震基盤面) の標高。右図：今回作成したモデルによる地盤下面 (地震基盤面) の標高。星印は震央、逆三角は観測点をそれぞれ示す。

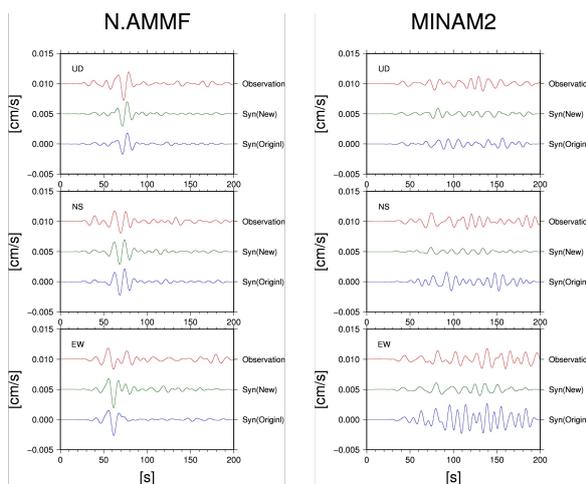


図 10 観測波形と理論波形の比較 (周期 10~40 秒の帯域)。赤線が観測波形、緑線が本研究による新モデルで計算された波形、青線は従来モデル (小松 2018) で計算された波形。

6 今年度の進捗状況と今後の展望

東北沖パート (§ 5.1) では、2011 年東北地方太平洋沖地震震源域の全波形トモグラフィーに関する海溝付近の観測点カバレッジを向上させるために、海底地震計データの本格的な導入の可能性について検討を行なった。まず ① 海底における地動を表現するグリーンテンソル波形を、固体・流体境界条件を考慮した HOT-FDM を用いて生成した。この地震波シミュレーションには TSUBAME-3.0 を利用した。② 23 観測点の海底地震計データの品質を慎重に検討してデータ選択を行なった。③ 海底地震計データを追加した FAMT 解析を実施して結果を検討し、観測波形の鉛直成分だけではなく水平成分も良好に再現できること、最適震源位置やモーメントテンソルは陸上データのみを利用した場合と調和的であること、などの結果を得た。これらの結果から、海底地震計データを全波形トモグラフィ解析に追加できる見通しを立てることができ、本年度の目的の主要部分を達成できた。来年度は海底地震計データをを用いた地震解析数をさらに増やし、海底地震計データを含めた波形トモグラフィの研究を進める。なお、東北沖パートでは付与された計算資源のほとんど (99.8%) を消費して、グリーンテンソル波形計算のための地震波シミュレーションや計算結果を保存するストレージ使用料などのために利用させていただいた。

南西諸島のパートでは、①南西諸島前弧域の最新の反射法探査測線で地盤構造を補完し、琉球海溝に沿った地盤の新しい厚さモデルを作成した。②その新モデルを従来の構造モデルに組み込んで地震波のテスト計算を実施し、地盤モデルの違いによる地震波伝播の違いを検討した。③南大東島観測点で記録された観測波形のモデリングを実施して、新モデルにより波形再

現性が向上することを示せた。この結果は、新しいモデルによって奄美群島・沖縄諸島の観測点だけを使う場合よりも観測点配置を改善できる可能性を示唆する。このように今後の展開が期待できる結果が得られ、本年度の目的をほぼ達成できた。来年度は南西諸島の地質構造の地域間のギャップをより反映させる形で今年度作成したモデルをさらに改良して、南西諸島域を伝播する波動場モデリングの改善を目指す。なお南西諸島パートでも付与された計算資源（名古屋大学 FX1000）の全てを消費して、地震波シミュレーション他のために利用させていただいた。

7 研究業績一覧（発表予定も含む）

学術論文（査読あり）

該当なし。

国際会議プロシーディングス（査読あり）

該当なし。

国際会議発表（査読なし）

Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka, Takeshi Nakamura, 'Modeling the waveform records from the ocean-bottom seismograph network (S-net) for the full waveform tomography of the 2011 Tohoku-Oki earthquake source area', *American Geophysical Union 2023 Annual Meeting*, S06 – 1380259, Jan. 25, 2024.

国内会議発表（査読なし）

岡元 太郎・竹中 博士・中村 武史、2011 年東北地方太平洋沖地震震源域の全波形トモグラフィを目的とした海底地震計 (S-net) 波形データのモデリング、日本地震学会 2023 年度秋季大会、S01P-05、2023 年 11 月 1 日。

公開したライブラリ等

該当なし。

その他（特許、プレス発表、著書等）

該当なし。

参考文献

- 1 Okamoto T, Takenaka H, Nakamura T, Hara T (2017) *Earth, Planets and Space* **69**:88.
- 2 Okamoto T, Takenaka H, Nakamura T (2018) *Earth, Planets and Space* **70**:98.
- 3 Nakamura T, Takenaka H, Okamoto T, Kaneda Y (2012) *Bull Seism Soc Am* **102**:2420–2435.
- 4 岡元太郎・竹中博士 (2005) 地震 **57**:355–364.
- 5 中村武史・竹中博士・岡元太郎・金田義行 (2011) 地震 **63**:189–196.
- 6 Okamoto T, Takenaka H, Nakamura T, Aoki T (2013) in *GPU solutions to multi-scale problems in science and engineering*, Chapter 24. Springer, Berlin.
- 7 Aoi S, Asano Y, Kunugi T, Kimura T, Uehira K, Takahashi N, Ueda H, Shiomi K, Matsumoto T, Fujiwara H (2020) *Earth, Planets and Space* **72**:126.
- 8 Ekström G, Nettles M, Dziewoński A M (2012) *Phys Earth Planet Int* **200–201**:1–9.
- 9 Nakamura T, Hayashimoto N (2019) *Geophys. J. Int.* **216**:1413–1427.
- 10 Hayashimoto N, Noguchi K, Satio J, Hoshihara M (2023) *Journal of Seismology, Volcanology and related Engineering* **86**:4.
- 11 Takagi R et al. (2019) *Seismo. Res. Lett.* **90**:2175–2187.
- 12 小松正直 (2018) 岡山大学博士学位論文.
- 13 小松正直・竹中博士・岡元太郎・中村武史 (2023) 地震 **76**:17–30.