

# 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年東北地震震源域と南西諸島域

岡元太郎（東京工業大学）

## 概要

本研究の最終目標は全波形トモグラフィーを用いて2011年東北地方太平洋沖地震震源域および南西諸島域の3次元速度構造モデルの推定と改良を行うことである。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 (§ 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 (§ 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 (§ 5.2)。

## 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 (Type I) 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

本研究では大規模地震波シミュレーションの結果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。本課題研究の対象領域は2011年東北地方太平洋沖地震（以下、「東北沖地震」と記載する）の震源域と南西諸島域の2つとする。今年度は、東北沖地震のパートでは空間分解能の詳細な検討と分解能を向上させるための研究を行った。南西諸島域のパートでは、特

に2021年12月に発生したトカラ列島群発地震について設定した構造モデルのもとでのグリーンテンソル波形の特徴の考察や、FAMT解析による群発地震群の精密震源パラメータの推定に関する研究を行った。

本研究の特徴は、構造パラメータ摂動に対する波形の摂動量を示す「感度カーネル」を高周波近似の波線理論等によらず波動論に基づいて計算することや、独自のFirst-motion Augmented Moment Tensor (FAMT) 解析 (Okamoto et al. 2017, 2018) を適用することなどが挙げられる。FAMT解析は、長周期の全波形と短周期のP波初動波形の両方を用いることにより、海域の地震の震源解析で生じやすいバイアスをできる限り小さくした震源パラメータを求める手法として我々が提案したものである。このようにして改良した3次元構造モデルを用いて短周期波形の再現性を向上させ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の考察を短波長域に拡張することが本研究の意義である。

### 3 当拠点公募型研究として実施した意義

日本列島周辺が代表例であるプレートの沈み込み帯は、海水層・不規則海底地形・厚い堆積物層・沈み込む海洋プレートなどから構成されており、地球内部構造の3次元不均質性が強い。その効果は地震波動場に伝播経路の屈曲などとして強く表れる。地震波波形を用いた震源物理研究では、それらの強い不均質構造の効果を考慮した地震波伝播シミュレーションが必要になる。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程度となり、計算は大規模になる。しかもこの大規模計算を多数の観測点に対して実施する必要がある。特に

今年度は東北沖領域において50ヶ所以上の海底観測点に対する計算を新たに実施したため、多数の大規模計算が必要となった。これらの大規模計算は、本公募の共同研究であったことから実施することが可能となった。

具体的には、東京工業大学のTSUBAME-3.0では格子間隔：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1.1時間、という規模の計算を100回近く実施して海底地震計を対象としたグリーンテンソル波形を生成し、FAMT解析によって計算波形が観測波形を良好に再現できることを確認できた。また、名古屋大学のFX1000では格子間隔：0.10 km、格子サイズ：3201×2201×801、時間ステップ：30001 (150 s)、使用ノード数：216、計算時間：約40分、という規模の計算を繰り返し実施して、トカラ列島域対象のグリーンテンソル波形を生成できた。

### 4 前年度までに得られた研究成果の概要

本課題研究の最終目標は全波形トモグラフィー手法を用いて2011年東北地方太平洋沖地震震源域および南西諸島域の3次元速度構造モデルの推定と改良を行うことである。この目標に向けて前年度は以下の研究を行なった。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全波形トモグラフィーで用いる感度カーネルの時間領域における特徴を検討した。②全波形トモグラフィーの逐次近似1回目に相当する逆問題計算を試行して、地震波速度としては現れにくい密度等のパラメータの修正量を得られる可能性などを示すことができた。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

規模計算結果をもとにした計算波形と観測グリーン関数波形との比較により、設定した構造モデルの特徴を検査することができた。特に、①南西諸島域のほぼ全域に相当する約1000 kmにわたる伝播距離に関する理論波形の計算、②その理論波形と観測グリーン関数との比較検討により観測グリーン関数の特徴をある程度まで再現できる場合があることを見出したこと、③比較的近距离 ( $\leq 200$  km) かつ長周期 (周期 10–20秒) では波形を良好に再現できることの確認、などの成果を得た。

## 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 東北沖の全波形トモグラフィー

本課題研究の全波形トモグラフィーは次のようなステップで進められる。

地震パラメータの精密推定 (FAMT解析<sup>(\*)</sup>)

(\*) 「2 研究の目的と意義」を参照



構造パラメータ摂動量の推定 (逆問題解析)

今年度はまず、①地震データ数を増やすための追加FAMT解析と、②逆問題解析の性質を理解するために分解能行列の検討を行った。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、海溝付近のデータを増強するために海底地震計データを追加することとした。今年度はその準備として、③海底地震計データを加えたFAMT解析を行なった。

#### 5.1.1 分解能行列の検討

今年度は図1に示した領域について24個の地震の広帯域波形データを用いた暫定解析を行なった。このうちの9地震は今年度に追加した。これらと、再解析した1地震の合計10地

震については新たにFAMT解析を行なって震源パラメータを推定し、それぞれについてTSUBAME-3.0のGPU126基を用いた大規模地震波シミュレーションによって感度カーネル生成のための波動場を計算した。その計算パラメータは表1に示した。なお陸上観測点対象のグリーンテンソル波形は、昨年度に計算したものを利用した。

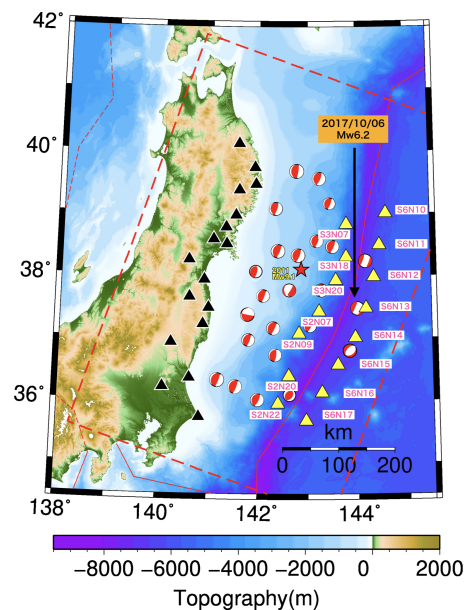


図1 解析に用いた地震 (Global CMT解) と観測点の分布。黒の三角は陸上観測点 (KiK-netおよびF-net)、黄色の三角は海底観測点 (S-net)。星印は2011年東北沖地震の震央を、矢印で示したのは2017年の地震の震央 (§ 5.1.2)、点線の矩形は計算対象領域をそれぞれ示す。

線形化した逆問題解法において分解能行列  $\mathbf{R}$  は「(仮想的な) 真のモデルパラメータ  $\mathbf{m}_{\text{exact}}$ 」と「モデルパラメータの推定値  $\tilde{\mathbf{m}}$ 」について次の関係を持つ (Tarantola 2005;  $\mathbf{m}_{\text{prior}}$  は初期値)。

$$\tilde{\mathbf{m}} - \mathbf{m}_{\text{prior}} = \mathbf{R} (\mathbf{m}_{\text{exact}} - \mathbf{m}_{\text{prior}})$$

つまり  $\mathbf{R}$  が単位行列に近いほど分解能が高いと見なされる。そこで3次元構造モデルのもとの空間分解能を調べるために、3次元初期モデルに対する分解能行列を検討した。

全波形トモグラフィーにおける逆問題解析では、震源位置などに対応する感度カーネル行列要素の値が極端に大きくなって逆問題を解きにくくなるという問題が知られている。そこで今年度はKubina et al. (2018) を参考にして感度カーネル行列に前処理（規格化）を導入した。この前処理によって分解能行列も平滑化され、安定な結果が得られるようになった。

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
シミュレーション回数	109 (*)
1回あたり出力サイズ	498 GB
1回あたり計算時間	4057.7 s (平均値)

(\*) 10回は地震を対象としたフォワード計算、99回はS-net観測点を対象としたグリーンテンソル計算。

本課題の逆問題は対象領域を39 × 28（水平方向） × 5（深さ方向）のブロックに分割して、初期3次元構造モデルのもとでの各ブロックの物性パラメータ摂動量を求めるように定式化した。図 2と図 3には第1層ブロック（深さ0–8.4 kmに対応）での剛性率に関する結果を示す。得られた摂動量（図 2（左））は初期値に対して数%程度の大きさを示し、陸地側では正の（剛性率を増加させる）摂動がやや卓越し、海溝に近い部分では負の（剛性率を低下させる）摂動量がやや卓越する傾向が見られる。

分解能行列の対角成分の大きさ（図 2（右））を見ると陸寄りの領域は濃い赤色で示される相対的に大きめの値になっており、広範囲に渡ってある程度の分解能が得られる可能性があるこ

とがわかる。一方、海溝近くの領域（図 2（右）の右半分ほど）では分解能行列の対角成分が相対的に小さくなっており、分解能が相対的に小さくなっていることが見て取れる。これらの特徴は図 3（左）に示した推定値の誤差にも現れている。すなわち陸地側では相対誤差がおよそ1–2%程度である。しかし海溝（図 3（左）の右端近くに描かれている曲線）よりも外側では相対誤差が大きくなっていることがわかる。このように分解能行列を検討することにより、海溝近傍や海溝の外側では分解能が相対的に低下することが示唆された。また第2層以深でも分解能は相対的に小さいことが観察された。

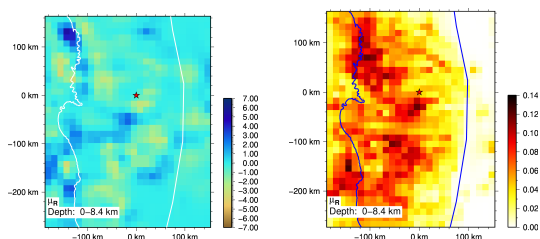


図 2 第1層ブロック（深さ0–8.4 km）についての（左図）剛性率摂動量（相対値 %）、（右図）分解能行列の対角成分の大きさ。図 1の陸上観測点（16点）のデータだけを用いて解析した結果に基づく。

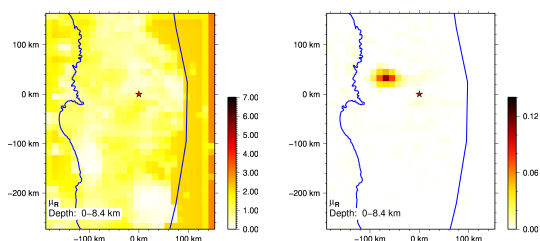


図 3 第1層ブロック（深さ0–8.4 km）についての（左図）剛性率摂動量の相対誤差、（右図）第1層の一つのブロック（縦軸=33.5 km、横軸=-67.7 kmの位置）をターゲットとした時の第1層の各ブロックに関する分解能行列の大きさ。図 1の陸上観測点（17点）のデータだけを用いて解析した結果に基づく。

なお、一つのブロックに関する分解能行列要素（分解能行列の一つの列の要素）をプロットすると図 3（右）のようになり、対象ブロックを中心として数ブロックの広がりを持つことがわかる。これが空間的な分解能を表しているこ

みなされる。

### 5.1.2 海底地震計データのモデリング

上述のように、分解能行列を検討することにより、海溝近傍や海溝の外側では分解能が相対的に低下することが示唆された。しかし海溝付近は水深が深く大きな津波を発生させる地域であると考えられるため、この領域も重要な解析対象となる。そこで海溝近くのデータを増やして分解能向上を図るために、海底地震計データを導入する。ここで導入するのは防災科学技術研究所が整備してきた日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) のデータである。S-netは房総沖から北海道沖にかけて敷設された海底ケーブルにより150ヶ所に設置された観測機器からなり、2017年4月から海溝外側 (アウターライズ域) の観測点を含めた全体が稼働している。2011年東北地方太平洋沖地震の震源域にはおよそ60ヶ所の観測点が位置する。

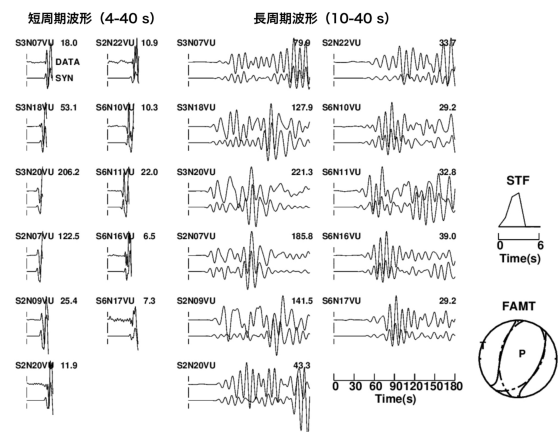


図4 2017年の $M_W$  6.2の地震 (図1) を対象とした海底地震計データ波形とFAMT解析による計算波形との比較 (上下動速度成分)。各波形ペアの上側が観測波形、下側が計算波形。震源時間関数 (STF) とFAMT解の震源球 (FAMT) も示した。

本研究では全波形トモグラフィーに向けた準備として、海底地震計データを用いたFAMT解析が可能であるかどうかを検討することとした。まず研究対象地域である2011年東北地方太平洋沖地震の震源域に位置するS-net海底観

測点のうち59観測点の上下動成分と、20観測点の水平動成分 (計40成分) の、全99成分についてグリーンテンソル波形計算のための大規模地震波シミュレーションを実施した (表1)。

FAMT解析として、ここでは海溝の外側 (アウターライズ域) で発生した2017年10月6日の地震 (GCMT  $M_W$  6.2; 位置は図1) の結果を示す。S-netの地震計は海底ケーブルに固定されているため各成分の方位は観測点ごとに異なっている。そこで海溝を挟むような11観測点 (図1の黄色三角) について、Takagi et al. (2019) に倣って加速度計の3成分を回転して上下動成分を合成し、解析に利用した。なおS-netの地震計は強い地震動の場合に向きが変化する可能性がある (Nakamura & Hayashimoto 2019)。本解析で用いた波形データでは、上下動成分の合成に必要な2つの角度 (rollとpitch) の変化が地震動の前後でそれぞれ0.1%以下であることを確認した。

表2 FAMT解の震源位置

	陸上のみ	陸上+海底地震計
横軸	129.6 km	126.0 km
縦軸	-33.0 km	-33.6 km
深さ	13.1 km	13.1 km

横軸・縦軸は図2および図3に示した座標系に対応しており、縦軸は $N20^\circ E$  (北から東へ20度の方向)、横軸は $E20^\circ S$  (東から南へ20度の方向) である。

FAMT解析の結果として得られた計算波形と観測波形との比較を図4に示す。これは陸上観測点 (図1の黒三角) と海底観測点 (図1の黄色三角) の両方を用いた場合の解析結果であり、そのうちの海底地震計の波形のみを示した。短周期帯域 (4-40 s) のP波初動波形でも、長周期帯域 (10-40 s) の表面波波形でも、多くの観測点で観測波形の主要部分が計算波形によって再現できていることが図4からわかる



(なお短周期帯域はS2N20,S2N22で、長周期帯域はS2N09, S2N20, S2N22で、計算波形による再現性が低下している)。このように多くの観測点で波形の再現性が良好であることから、海底地震計の波形データを使ったFAMT解析が可能であると考えられる。このことから、海底地震計データを取り入れた全波形トモグラフィも実施できると考えられる。

なお、この地震について海底地震計データを追加した場合と、陸上観測点データのみで解析した場合とで推定された震源位置を比較した(表2)。その結果、深さの推定値は同一となり、水平方向の相違も約3.6 kmであった。この相違は地震波を放射する震源断層のサイズ(~10数 km) よりも小さく、FAMT解析の推定精度の範囲に収まると考えられる。S-net稼働以前の地震に対するFAMT解析は陸上観測点データのみを使ったものになるが、ここでの結果から、S-net以前の解析結果の信頼度は十分なものであると考えられる。

表3 南西諸島領域の計算パラメータ

格子サイズ	3201 × 2201 × 801
格子間隔	100 m
時間間隔	0.005 s
時間ステップ数	30001 (150秒間)
ノード数	216
プロセス・スレッド数	864・12
計算時間	1成分あたり約41分

### 5.1.3 南西諸島域：トカラ列島群発地震のFAMT解析

今年度はトカラ列島で近年発生している群発地震に対するFAMT解析のための研究を行った。この群発地震では図5および図6に示すように観測点は震源域から遠方にあり、観測点数も少ない。そのため、このような状況で良好な

解析結果が得られるかを検討することがこのテーマの最初の課題となる。

まずFAMT解析に用いるグリーンテンソル波形の計算を行った。グリーンテンソル波形の計算は候補となる震源位置ごとに実施する。ここでは本課題以前に計算した震源候補点の範囲を囲むように、2 km間隔の27780点のセントロイド震源候補点を本課題において追加設定した。図5(左)の赤い領域が候補点領域の水平方向範囲を示す。そして、この領域を含む大領域(320 × 220 × 80 km)を対象としてグリーンテンソル波形の追加計算のための大規模地震

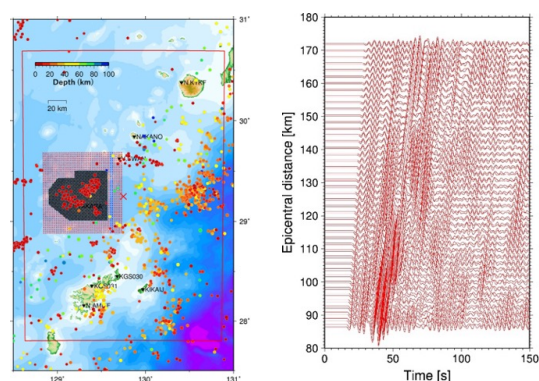


図5 (左図) 赤線で囲まれた領域が差分法計算領域を示す。黒い逆三角が観測点、色つきの丸がF-netによって決定された震源の位置、黒いバツ印の領域が計算済みの震源候補点、赤いバツ印の領域が本研究で追加計算した震源候補点の領域をそれぞれ示す。(右図) 震源を左図の青いバツ印の範囲として、観測点をN.AMMFとした時のグリーン関数 $G_{nn,n}$  ( $n$ は北向きで、コンマは震源位置での偏微分)の波形を震央距離順に描いたもの。横軸は時間、縦軸は震央距離。

波シミュレーションを行った。深さの範囲は2-40 kmまでであり、島弧マントル最上部もカバーする。対象となる観測点は奄美大島から屋久島にかけて分布する防災科研のF-net・K-NETの観測点、ならびに気象庁の観測点の計8点である。計算は表3に示すように格子間隔100 mで30001時間ステップ行った。1回あたりの計算時間は約41分で、1観測点につき3回

(3成分) 計算を実施した。これらの計算では小松 (2018) の構造モデルを用いた。

グリーンテンソル波形計算結果の一例として観測点N.AMMF (奄美大島) について、深さ10 kmに設定した多数の震源候補点からのグリーン関数波形を震央距離で並べたものを示す (図5 (右))。30秒以降に見られる後続波には、3次元的な地下構造の違いによると考えられる距離依存性が見られる。

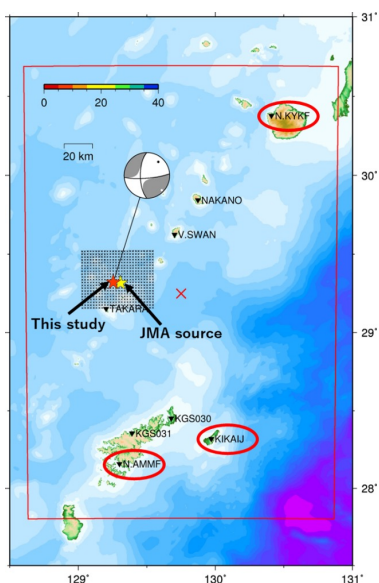


図6 FMT解析対象とした地震の震央とFMT解。解析に使用した観測点を赤丸で囲んだ。黒点は格子探索に用いた震源の候補点 (深さ方向にも候補点は設定した)。星印は気象庁震源並びに本解析で推定されたFMT解の震央で、色は深さを表す。FMT解のメカニズムを震源球で示す。

次に実際にトカラ列島で発生した地震について、計算したグリーンテンソル波形と観測波形を用いてFMT解析を行った。対象とするものは2021年4月10日に発生した $M_{JMA}$  4.5の地震である (図6)。この地震について、F-netの2観測点と気象庁1観測点の波形データとグリーンテンソル波形を解析に用いた。各波形には周期6-40秒、15-40秒のフィルタをかけて使用した。解析した結果、気象庁の震源よりも西側に最適震源位置が得られ、横ずれ成分を含むメカニズムのFMT解が推定された (図6)。深さは

8 kmで上部地殻内に位置する。これは気象庁震源よりも10 kmほど浅い。グリーンテンソル波形を用いて合成された理論波形は観測波形をよく説明している (図7)。このように遠方の少数のデータだけでも良好な解析結果が得られたことから、今後も群発地震の解析を継続し、トカラ列島で発生した地震の震源分布並びにメカニズムを明らかにしていく。

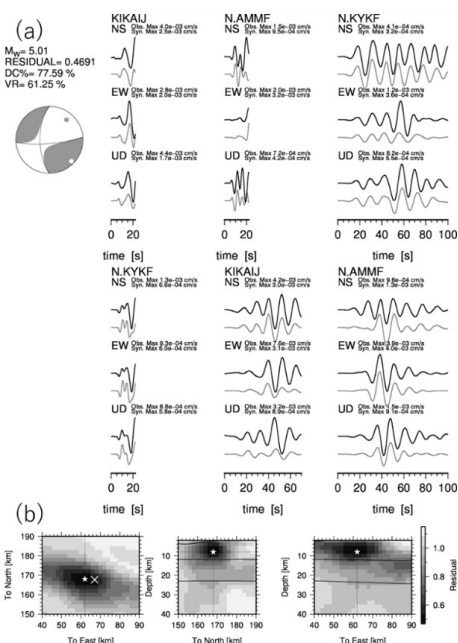


図7 (a)FMT解析による観測波形 (黒線) と理論波形 (灰色線) の比較。(b)FMT解析の評価関数F値の空間分布。左から水平方向、鉛直2方向を示す。色が濃いほど、その震源による理論波形が観測波形に近くなる。星が最適解の位置、×印は気象庁の震央。黒線は層の境界を示す。

## 6 今年度の進捗状況と今後の展望

東北沖のパートでは、① 解析対象地震を増やして、暫定的な全波形トモグラフィーを実施することができた (§ 5.1.1)。本報告書では剛性率 (S波弾性率) の結果のみを紹介したが、P波弾性率と密度も全波形トモグラフィーの逆問題解析によって推定しており、それぞれの物性パラメータがどのように推定されるかについても考察することができた。② 分解能行列

について詳細に検討し、海溝付近および海溝の外側では分解能が相対的に低下することを見出した (§ 5.1.1)。しかし海溝近傍は重要な解析対象地域であることから、データを増強して分解能向上を図るために海底地震計データを導入する必要があると考えられる。そこで③ 海底地震計データ導入の準備として、海底地震計データを追加したFAMT解析を行い、海底地震計の波形データを良好に再現できることを確認できた (§ 5.1.2)。以上のように今年度は多くの項目において成果を上げることができた。なお、東北沖パートでは付与された計算資源のほとんど (94.4%) を消費して、グリーンテンソル波形の計算や感度カーネル計算などのために利用させていただいた。

東北沖の全波形トモグラフィーは2023年度も継続する。解析対象地震の数をさらに増やし、加えて上記のように有効性を確認できた海底地震計データを追加することによって、海溝付近までを含めた対象地域の構造モデル改良を進める予定である。

南西諸島のパート (§ 5.2) では、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、またグリーンテンソル波形の特徴についても考察を行った。さらに対象領域の地震に対して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。なお、南西諸島パートでは付与された計算資源の全て (100%) を消費して、グリーンテンソル波形計算など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)

該当なし。

### 国内会議発表 (査読なし)

岡元太郎・竹中博士・中村武史、東北地方太平洋沖地震震源域の波形トモグラフィー：分解能行列の検討、日本地震学会2022年秋季大会、2022年10月24日 (札幌市)

### 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

- Okamoto T, Takenaka H, Nakamura T, Hara T (2017) *Earth, Planets and Space* 69:88. doi:10.1186/s40623-017-0672-9
- Okamoto T, Takenaka H, Nakamura T (2018) *Earth, Planets and Space* (2018) 70:98. doi:10.1186/s40623-018-0871-z
- Tarantola A (2005) Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation, *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 352pp.
- Kubina F et al. (2018) *Bull. Sismo. Soc. Am.*, **108**, 1257–1271. doi:10.1785/0120170265
- Takagi R et al. (2019) *Seismo. Res. Lett.* **90**, 2175–2187. doi: 10.1785/0220190093
- Nakamura T, Hayashimoto N (2019) *Geophys. J. Int.* **216**, 1413–1427. doi: 10.1093/gji/ggy502
- 小松正直 (2018) 南西諸島における地震波減衰構造の推定とそれに基づく地震動シミュレーションのための広域地下構造モデルの構築、岡山大学博士学位論文。