

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（東京科学大学）

概要

東北沖パートでは、2011 年東北地方太平洋沖地震震源域における全波形トモグラフィーに向けた次の研究を行った。[§ 5.1.1] マグニチュード 5～6 程度の中規模地震を対象として日本海溝海底地震津波観測網（S-net）データを追加した解析を継続した。これは特に海溝近傍の分解能向上を目的としている。[§ 5.1.2] 構造モデルの精度を向上させる方法の一つとして、マグニチュード 3～4 程度の小地震の震源パラメータを推定する波形解析を実施した。その結果、小地震でも特定の周波数帯域を用いることで震源位置やモーメントテンソルの推定が可能であること、P 波と S 波による震源位置に差が生じ、両速度構造モデルの整合が課題であることが明らかとなった。南西諸島域パートでは、構造モデル改良に向けた次の研究を行った。[§ 5.2.1] 沖縄トラフにおける地震活動に FAMT 解析を適用し、活断層の走向と整合する震源メカニズムが得られた。しかし長周期計算波形が観測波形をうまく説明できていない場合があり、浅部構造の改良が必要と示された。[§ 5.2.2] 前弧域を含む付加体（堆積物）の構造モデルの修正を行い、計算地震波形への影響を評価した。

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

- 東京科学大学 情報基盤センター
- 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 参加研究者の役割分担

岡元太郎 (東京科学大学)	研究代表者・TSUBAME 4.0 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)	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 (東京科学大学)	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)	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)	不老 (TypeI) での地震波 計算と構造モデルの検討
小割啓史 (岡山大学)	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ための研究を行う。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沈み込み帯での震源パラメータや破壊過程の解析を高精度化し、地震発生場の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

「2011 年東北沖地震」と記載)の震源域と南西諸島域であり、今年度はそれぞれ次のような研究を実施する。① 東北沖では全波形トモグラフィに加えて、海底地震計ネットワークで観測される海域の小地震データの解析を試み、地震発生場所や発震機構解と海溝近傍の構造モデルとの対比検討を目指す。② 南西諸島域では構造モデルの改良を続けて、FAMT 解析等によってモデルの妥当性を検討する。

3 当拠点公募型研究として実施した意義

沈み込み帯に位置する日本列島では、1944 年南海地震(気象庁マグニチュード(M) 7.9)、1946 年南海地震(M8.0)、2011 年東北沖地震(M9.0)のような巨大地震がたびたび発生する。これらの巨大地震や関連する地震活動の震源パラメータ(発生位置・発震機構・断層破壊過程など)と不均質地球内部構造との相関関係の研究は、沈み込み帯の地震発生場を理解して、巨大津波や強震動生成のメカニズムを探るための基礎情報を構築する上で重要である。

そこで我々は全波形トモグラフィによって沈み込み帯の短波長構造を改良する研究を継続課題として続けており、2023 年度には海域の分解能を向上させるために日本海溝海底地震津波観測網(S-net)のデータを追加した FAMT 解析と波形モデリングを試みた。2024 年度は上記の研究を継続するとともに、新たなサブテーマとして、これまで対象としていなかった M3-4 程度の小地震の解析を試みる。沈み込み帯の地震活動は、プレート境界面の応力状態や摩擦状態・境界面の結合状況・震源域物質の物性や形状などを反映していると考えられる。海底地震計によって海域の小地震の震源近傍における波形が得られることから、海底地震計データは海域の小地震活動と地球内部構造との相関

関係や、浅部構造の検討の上で重要な情報をもたらすと考えられる。一方で小規模地震の波形は卓越周波数が高く(1Hz 以上)、地震波計算の差分法格子間隔をこれまでの 10 分の 1 程度に小さくする必要がある。そのため地震波計算はこれまでよりも大規模なものになることから、性能が大幅に強化される TSUBAME-4.0 の利用が必須となる。

南西諸島では観測点が少なく強震動予測の高度化のための地球内部構造モデルはまだ不完全な状況である。そこで本研究では反射法探査結果に基づいて堆積物構造モデルを改良することと、FAMT 解析の結果を使って構造モデルの妥当性を検討する。この研究でも、地震波波形を使った解析や検討を行うことから大規模な地震波伝播シミュレーションが必要となる。これは名古屋大学の不老 Type I によって実現する。

4 前年度までに得られた研究成果の概要

東北沖パートでは、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。

5 今年度の研究成果の詳細

5.1 東北沖パート

5.1.1 海底地震計データを用いた FAMT 解析

本研究では特に海溝近傍領域の波形トモグラフィ分解能を向上させることを目的として、昨年度から日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) データを導入した。海底地震計データの取り扱いと、流体・固体境界面 (海底) での地震動計算のための実装法 (HOT-FDM) については昨年の報告書にまとめた。

今年度は、波形トモグラフィの準備として、2011 年東北沖地震震源域の、マグニチュード (M) 5-6 程度の中規模地震について日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) データを追加した解析を継続した。一例として 2018 年の地震 (Mw5.7) の解析結果を示す。この例では FAMT 解析^{*1}で得られた震源位置や節面傾斜

がプレート境界面とは一致せず、この地震がプレート境界型の地震ではないことが示される。

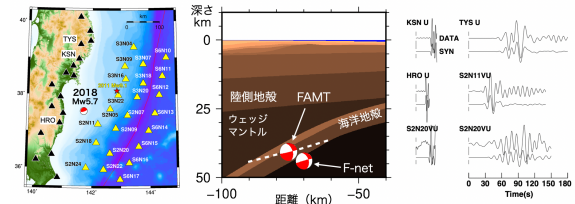


図 1 左図：東北沖パートの研究対象領域。解析に用いた陸上観測点 (黒三角)、海底観測点 (黄三角)、および地震の位置を示した。中図：構造モデル断面図に投影した解析例 (2018 年 2 月 26 日、Mw5.7) の発震機構解。NIED の F-net 解も示す。FAMT 解の低角の節面傾斜角 (14 度) はプレート境界傾斜角 (30 度) よりも小さいことからプレート境界型地震ではなく、低角または高角の節面で海洋地殻を断ち切るような地震を示唆する。右図：波形の比較例。各ペアの上側が観測波形 (DATA)、下側が計算波形 (SYN)。左列が周期帯 4-40 s の短周期上下動速度波形、右列が周期帯 10-40 s の長周期上下動速度波形。S2N11, S2N20 が海底地震計データ。

5.1.2 海底地震計データによる小地震解析

■小地震解析の必要性

本研究で進めてきた FAMT 震源解析は M5-6 の地震を主に対象としている。このサイズの地震による地動波形では、周期数秒以上の長周期成分でも観測波形の S/N 比が高くなり解析が可能となるためである。しかしこの周期帯では、波形解析で得られる震源位置の総合的な精度は、深さ方向では ± 2 km 程度になると考えられる (小松・他、2023)。このような震源パラメータ推定の精度が本研究で検討する地球内部構造モデルの精度にも反映される。そのため、さらに高い精度で構造モデルを検討するには、より短周期の地震波を用いて、空間的にもコンパクトな震源を対象とする必要がある。そこで今年度は陸海統合 3 次元構造モデルと有限差分法を用いて理論波形を生成し、海域の M3 ~ 4 程度の小地震の震源パラメータを推定するための波形解析を試みて、その課題を検討した。な

きる (Okamoto et al. EPS, 2017, 2018)。

^{*1} First Motion Augmented Moment Tensor (FAMT) 解析では、短周期 P 波の初動波形と長周期の全波形を組み合わせることで、震源位置・モーメントテンソル・震源時間関数を同時に推定で

お、今年度後半には震源近傍の観測点（図 2 の S3N23）を新たに追加して解析をやり直し、また新たな領域（図 2 の赤点線枠）を設定して解析するなど、中間報告時点から更新した内容となっている。

小地震解析には震源近傍での高密度観測が必要であり、海域の陸上観測網では限界がある。そこで本研究では日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の海底地震計データを利用する。S-net 加速度計による観測波形の前後のデータを用いて海底地震計の向きの変化が小さいことを確認した上で、Takagi et al. (2019) の方法で 3 成分を回転し、さらに時間積分して 3 成分速度波形に変換した。対象領域を図 2 に示す。

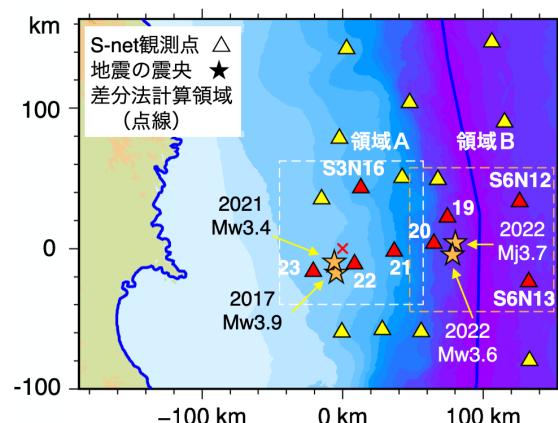


図 2 対象領域の図。星印が解析対象地震。× は 2011 年東北沖地震（Mw9）の断層破壊開始点。三角は S-net 観測点で、赤三角が解析に使った観測点。

■海底環境と観測データ

小地震はシグナルが弱くなるため、S/N 比の検討が重要になる。海底では脈動と呼ばれる連続的な地震動が周期数秒の大きなノイズ源となる。そのため振幅が小さい P 波初動部分では、0.1–1 Hz（周期 1–10 s）の周波数帯域では P 波初動のシグナルがノイズに埋もれてしまう（図 3）。そのため、本研究で解析に利用する短周期 P 波の周波数帯域は 1 – 2 Hz に設定する（図 3）。なお S 波については、震源から数

十 km 以内の観測点で、0.1–1.0 Hz の帯域が利用可能であることを見出した。中規模地震の FAMT 解析で用いる長周期帯（0.025–0.1 Hz）は、小地震ではノイズの影響が大きいため解析に利用できないこともわかった。

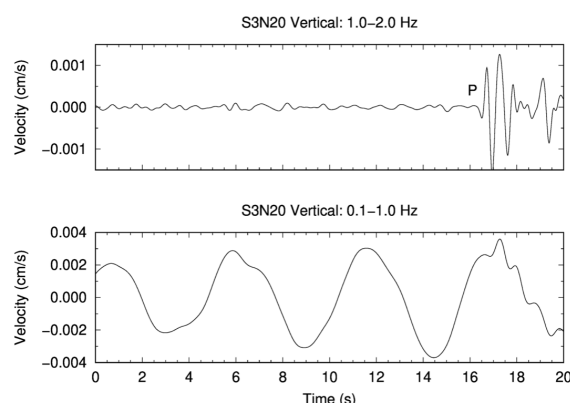


図 3 2017 年の小地震（Mw3.9）の観測波形例（上下動速度波形）。上段は周波数帯 1–2 Hz、下段は周波数帯 0.1–1 Hz。長周期側（下段）では脈動ノイズが大きいため、小地震のシグナルが埋もれる。

■地震波伝播シミュレーションと解析手順

この小地震解析に用いるグリーンテンソル波形を計算するための地震波伝播シミュレーションでは、岡元・他（地震学会 2023）で使用した陸海統合 3 次元モデルと HOT-FDM の並列 GPU 版（Nakamura et al. BSSA 2012; Okamoto et al. 2013）を使用した。計算には東京科学大学のスーパーコンピュータ TSUBAME-4.0 を利用した（表 1）。これまでの FAMT 解析では周期数秒以上の地震波を利用していたので格子間隔を 150 m としていた。しかし小地震の地震波シミュレーションでは 1–2 Hz の周波数帯の地震波を計算するために格子間隔を 25 m にする必要がある。これは従来よりも格段に小さな格子間隔であり、従来のように東北沖全体を計算領域とすることは計算規模が大きくなりすぎて実用上困難である。そこで図 2 に点線で示した東北沖の一部を対象とする領域（100 × 100 km、深さ方向は 37.5 km）を用いて計算することとした。この領域サイズでは東

北沖全体をカバーできないので地震群ごとに異なる領域を用いる必要がある。今回は図 2 に示したように、2011 年東北沖地震の破壊開始点付近で発生した小地震群を対象とする領域 A（白点線の矩形領域）と、より沖合で海溝に近い領域 B（赤点線の矩形領域）の 2 つの計算領域を設定した。グリーンテンソル波形は異なる領域の解析には使えないので、領域設定をどのように進めていくかも今後の課題である。

表 1 東北沖の小地震計算パラメータ概要

格子数	4096×4096×1500
時間ステップ数	32000
格子間隔	25.0 m
時間間隔	0.001225 s
最大周波数	3.93 Hz
GPU 数	32
計算時間	102.5 min

波が到着するまでの時間を**走時**という。予備的な解析（中間報告書等）により、小地震の解析では、S 波の観測走時（波が観測点に届くまでの時間）と計算走時が合うように調整した震源位置では P 波の観測走時と計算走時が合わなくなることが分かってきた。これは P 波速度構造モデルと S 波速度構造モデルが相互に整合していないことを示している。その差は典型的には 1 秒弱程度であるが、小地震では短周期波形を用いるためにこのようなわずかな走時のずれが顕在化する。そこで暫定的に、① S 波波形のみを用いた時空間格子探索とモーメントテンソル解析を組み合わせで最適震源位置とモーメントテンソル解（震源メカニズム）を決定する、② そのモーメントテンソル解に固定して、P 波波形のみをデータ波形として最適震源位置を推定する、という手順で解析することとした。既往の速度構造モデルの構築では P 波データが多く使われており、P 波速度構造の方が良く決まっていると考えられるためである。最終的には、P 波構造と S 波構造が整合するよ

うに構造モデルを改良しなければならない。

■解析結果

波形解析によって得られた観測波形と理論波形の比較結果の例を図 4 に示す（2017 年 9 月 3 日の地震、Mw3.9）。これは領域 1 の地震である（図 2）。まず手順①によって得られた解では、震源に近い S3N22 観測点や S3N23 観測点で観測 S 波波形は計算 S 波波形によって良好に再現できている。ただし（図示していないが）震源から離れた観測点では再現性が低下する。震源メカニズムは低角逆断層型でありプレート境界の地震である可能性が考えられる。しかし震源位置はプレート境界からやや離れた海洋地殻第 2 層と第 2 層の境界面付近に得られた（図 5）。次に手順②によって P 波のみを用いて得られた震源位置はやや浅くなりプレート境界面に近い位置に推定された（図 5）。

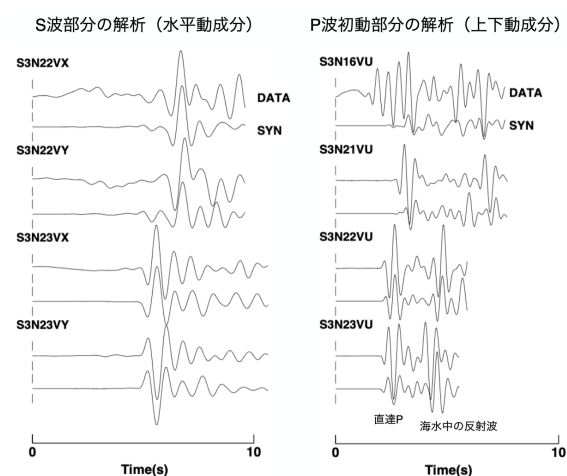


図 4 2017 年 9 月 3 日の地震 (M_w 3.9) の解析結果に基づいた波形の比較。左列は S 波だけによる解析結果（水平動速度成分：周波数帯域は 0.1–1 Hz）。各ペアのうち上が海底観測点（S-net）の観測波形（DATA）、下が計算波形（SYN）。右列は P 波だけによる解析結果（上下動速度成分：周波数帯域は 1–2 Hz）。

領域 1 の別の地震（2021 年 8 月 23 日、Mw3.4）と領域 2 の地震（2022 年 10 月 17 日、Mw3.6）について同様の解析を行なって得られた震源位置を図 5 に示す。これらの地震では、S 波で決めた震源よりも P 波で決めた震源が

浅くなる傾向が見られた。浅い部分（海底に近い部分）には本研究で用いた構造モデルには含まれない、より S 波速度が遅い局所的な堆積物が存在していると考えられる。そのようなモデル化されていない堆積物の効果のために短周期（短波長）S 波が影響を受けて震源位置の系統的な差異として現れるのかもしれない。このような例は、短周期波形の解析において、P 波速度構造と S 波速度構造の整合性が課題であることを示している。

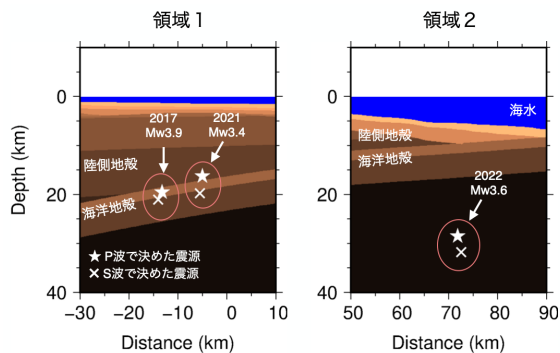


図 5 波形解析で得られた震源位置を構造モデル断面に投影した図。P 波波形で決定した震源位置を星印で、S 波波形で決定した震源位置を × で示した。[左] 領域 1。[右] 領域 2。

5.2 南西諸島域パート

5.2.1 沖縄トラフの FAMT 解析

今年度前半は南西諸島を挟んで琉球海溝の反対側に位置する沖縄トラフの地震活動と構造モデルを検討することとした。そのために、2022 年に多く発生した沖縄トラフ下の地震（図 6 の TARGET）を対象に FAMT 解析を行って震源パラメータを推定し、地震波形の検討を行った。FAMT 解析のために、図 6 の計算領域において観測点 A.OKED（地震予知総合研究振興会：沖永良部島）と N.KGMF（防災科学技術研究所 F-net：国頭）を加振する地震波伝播シミュレーションを用いて、相反定理に基づいて複数の震源の候補点の理論グリーン関数を計算した（その他の観測点を加振したグリー

ン関数は他研究課題で計算済み）。地震波伝播シミュレーションの計算には名古屋大学の不老 Type I を利用した。計算に用いたパラメータを表 2 に示す。

表 2 南西諸島域：計算パラメータ概要

格子数 ($n_x \times n_y \times n_z$)	4601 × 5401 × 801
時間ステップ数 (nt)	60001
格子間隔	0.1 km
時間間隔	0.005 s
計算時間	77.2 min

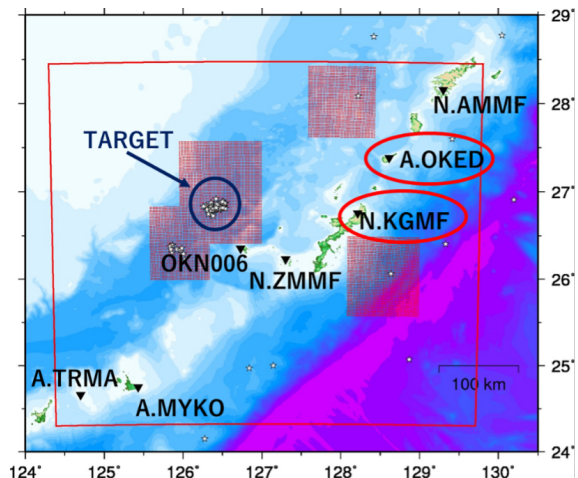


図 6 本研究課題の対象地域。赤四角はグリーン関数の計算領域の端を示す。黒逆三角は対象となる観測点。赤丸で囲った観測点はグリーン関数の計算で加振した観測点。星印は 2022 年に発生した Mw4.5 以上の地震の震央で、「TARGET」が本研究課題の対象震源域。赤点で覆われた領域は FAMT 解析における震源の候補点。

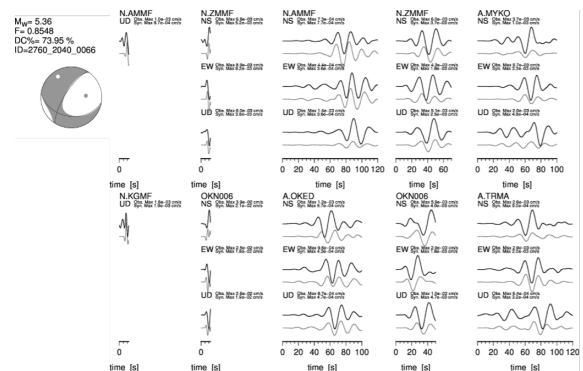


図 7 2022 年 2 月 9 日に発生した Mj5.6 の地震の FAMT 解析結果。震源球によりメカニズムを示す。黒線が観測波形、灰色線が最適解の理論波形。

計算されたグリーン関数を用いて FAMT 解析を行った例を図 7 に示す。このイベントは 2022 年 2 月 9 日に発生した地震で、短周期を

含む波形は周期 4–40 s、長周期を含む波形は周期 20–40 s でフィルタをかけたものをそれぞれ用いた。解析の結果、主要なフェーズを説明するメカニズム解が決定された。これらは北西–南東方向に伸張軸を持つ正断層型であり、沖縄トラフが伸張場であることと対応する。

今年度後半ではそのほかのイベントも合わせ、計 10 イベントの解析を行った（図 8）。その結果これらの地震の発生場所は、この地域に存在する海底活断層周辺の上部地殻内に位置し、気象庁一元化震源よりも浅い（深さ 4–6 km）ことが分かった。9 つの地震は上部地殻内の最も浅い候補点（深さ 4 km）に推定された。メカニズムはいずれも北西–南東方向に伸張軸を持つ正断層型で、周辺の海底活断層（この地域では正断層）の走向（北東–南西方向）に概ね整合した。ただし、小松・他（2023）と同様の周期 10–40s の周期帯では理論波形が観測波形をよく説明いない観測点も存在し、計算に用いた浅部の地下構造モデルが周期 10 秒前後を説明できていない可能性がある。この点は今後の課題の一つである。

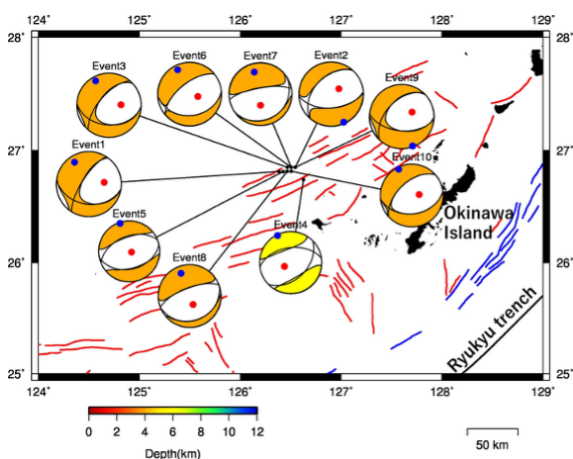


図 8 FAMT 解（メカニズム）の分布。イベント番号は地震発生順である。赤線、青線は海底活断層を示し、それぞれ正断層、逆断層である。震源球の色は深さに対応し、赤丸、青丸はそれぞれ圧縮軸、伸張軸に対応する。

5.2.2 前弧域の堆積物モデルの改良

また、今年度後半では 2023 年度に作成した前弧域の付加体を含む地下構造モデルをさらに修正した（図 9）。修正されたモデルによる計算波形への効果を検討するために、南大東島の気象庁観測点を加振したグリーン関数を計算した。計算に用いたパラメータを表 3 に、計算領域を図 10 に示す。計算結果のうち、観測点 N.KGMF（国頭）での波形を図 11 に示す。鉛直、南北、東西それぞれの方向で加振し、計算された計 9 成分の波形を回転することで、各観測点の鉛直方向、Radial 方向、Transverse 方向の波形を算出した。3 つの周期帯（5–40 秒、10–40 秒、20–40 秒）で比較すると、短周期を含む帯域ほど波形の違いが顕著である。特に、Transverse 成分の両モデルの波形が周期 5–40 秒と 10–40 秒で特徴が異なり、周期 10–40 秒では、既往モデルの方が後続波が卓越している。今後、さらにモデルの違いによる波形への効果を検討し、実際の観測波形との比較も試みて構造モデルの妥当性を検討する。

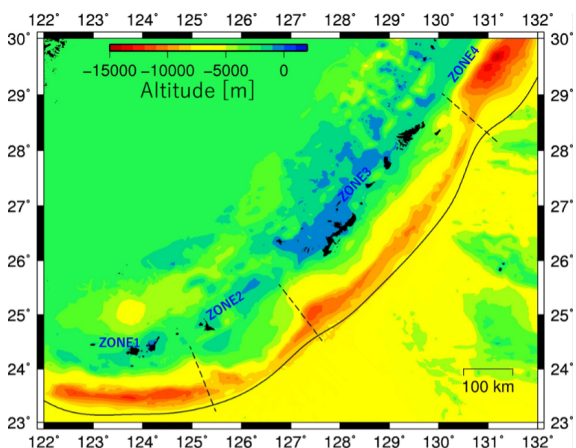


図 9 修正された付加体を含む地下構造モデル。地盤の最下部の標高を示す。

表 3 南西諸島域：計算パラメータ概要

格子数 ($n_x \times n_y \times n_z$)	4001 × 5401 × 1001
時間ステップ数 (nt)	60001
格子間隔	0.1 km
時間間隔	0.005 s
計算時間	192 min

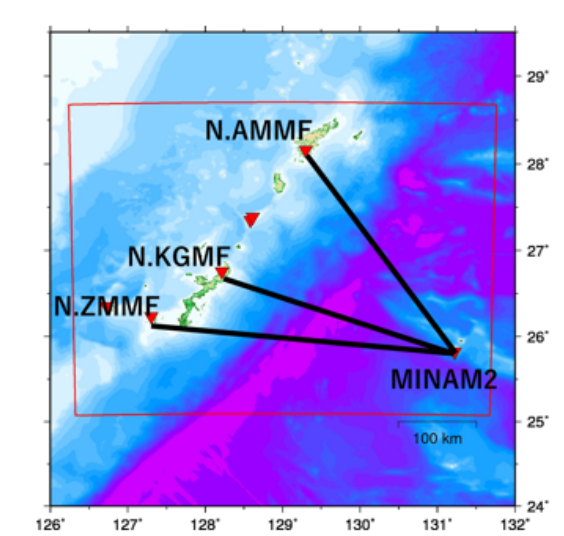


図 10 対象地域。赤四角はグリーン関数の計算領域の端を示す。赤逆三角は対象となる観測点。

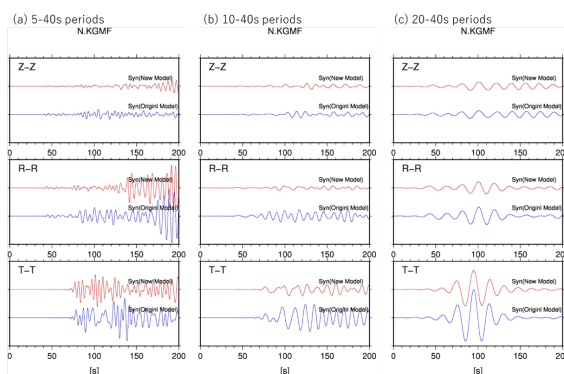


図 11 観測点 N.KGMF における理論波形の比較。赤線は修正モデルによる計算結果。青線は小松 (2018) の構造モデルを用いた計算結果。

6 今年度の進捗状況と今後の展望

東北沖パートでは、与えられた計算資源の約 99% を利用して、全波形トモグラフィーに向けた次の研究を行った。[§ 5.1.1] 海溝近傍領域の波形トモグラフィー分解能を向上させるために、M5-6 程度の中規模地震について海底地震計 (S-net) データを追加した解析を継続した。[§ 5.1.2] 海域の M3 ~ 4 程度の小地震の震源パラメータを推定するための波形解析を試みて、その課題を検討した。これは、高い精度で構造モデルを検討するために、今までよりも短周期の地震波を用いて、空間的にもコンパクト

な震源を対象とする必要があるためである。その結果 ① 小地震でも、0.1-1 Hz の周波数帯域の S 波部分を用いた波形逆解析によって震源位置やモーメントテンソルなどを推定できること、② 1-2 Hz の周波数帯域の P 波初動部分を用いた波形解析で震源位置推定が可能になること、③ P 波で決めた震源位置と S 波で決めた震源位置には「ずれ」があり、P 波速度構造モデルと S 波速度構造モデルの整合性が課題であること、などの知見を得た。このように、今年度はトモグラフィーのための解析結果を蓄積し、また、小地震解析の可能性も確認できたことから、今年度の目標の主要部分を達成できたと考える。今後は中規模地震の解析結果を蓄積してトモグラフィー解析を進めるとともに、小地震解析結果をトモグラフィー解析に組み込む方法について考察を続ける。

南西諸島域パートでは、与えられた計算資源の 100% を利用して、構造モデル改良に向けた次の研究を行った。[§ 5.2.1] 沖縄トラフの地震活動と構造モデルを検討した。この地域の地震に FMT 解析を適用して得られた震源メカニズムの走向は、周辺の海底活断層の走向に概ね整合する結果が得られた。また周期 10-40 s の帯域では理論波形が観測波形をよく説明できない観測点も存在し、計算に用いた浅部の地下構造モデルの改良が必要であることが示唆された。[§ 5.2.2] 2023 年度に作成した前弧域の付加体を含む地下構造モデルのさらなる改良を進めて、計算波形への効果を検討した。このように、今年度は沖縄トラフ域での構造モデルの課題を見出し、さらに琉球海溝前弧域の堆積物モデルの改良を達成するなど、大きな進展があったと考える。今後は、さらにモデルの違いによる波形への効果を検討し、実際の観測波形との比較なども試みて構造モデルの妥当性を検討する。