

jh250084

# 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] 陸上観測点データのみを利用できる地震と、海底観測点データも利用できる地震の両方について、再解析による確認と追加解析を行ない、昨年度までよりも信頼度の高いデータ数を増やした。[§ 5.1.2] 分解能行列を検討し、海底観測点データを追加することによって分解能が相対的に向上することが見出された。また全波形トモグラフィを試行して、大規模な構造境界と不均質構造との関連の可能性が示唆された。南西諸島パートではトカラ列島群発地震の研究を行った。[§ 5.2.1] トカラ列島周辺領域の候補点におけるグリーン関数波形を追加計算し、2021年と2025年に発生した地震16個のFAMT解析を実施した。これは地震活動を検討する基盤的な情報となる。[§ 5.2.2] 観測データを増やすために広域の大規模地震波シミュレーションを行なった。その計算結果を用いてFAMT解析を試行し、波形再現性などの検討を行った。

## 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
小松正直 (岡山学院大学)	不老 (Type I) 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 (Type I) 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 (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

日本周辺の沈み込み帯では、海洋プレートの沈み込みに伴い巨大地震が繰り返し発生しており、その発生はプレート境界の応力・摩擦状態や構造不均質に密接に関係する。しかし東北沖日本海溝では既存の3次元不均質速度構造モデルを用いても、周期数秒程度の地震波全体を再現することは難しい (Okamoto et al., 2018)。これは短波長の構造不均質に関する知識が十分ではないことを示唆しており、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。本課題の対象領域は 2011 年東北地方太平洋沖地震 ( $M_W$  9.1, 以下「2011 年東北沖地震」) の震源域と南西諸島域の 2 地域である。

本研究の意義は、高精度震源パラメータ推定手法として我々が提案した First-motion Augmented Moment Tensor (FAMT) 解析と、波動論に基づく全波形トモグラフィーを組み合わせて、震源パラメータと不均質構造の関係を高精度に明らかにし、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。

### 3 当拠点公募型研究として実施した意義

日本周辺は厚さ数 10 km～約 100 km の海洋プレートが地球内部に潜り込んでいく沈み込み帯であり、「南海トラフ地震臨時情報 (巨大地震注意)」が初めて出された日向灘の地震 (2024 年 8 月、 $M7.1$ ) や 2011 年東北沖地震のような大地震・巨大地震がしばしば発生する。このような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。例えば、プレート境界が強く結合した領域の周囲や、プレート境界面形状が不規則な場所に微小地震が発生する現象が観察されている (Wickham-Piotrowski et al., BSSA 2024)。そのような沈み込み帯での微小地震から巨大地震にわたる地震活動を評価するためには、不均質構造と、地震の発生位置・発震機構解 (モーメントテンソル)・震源時間関数 (モーメント率関数) などの震源パラメータに関する精密な知見が重要になる。

そこで我々は、(1) 東北沖における、独自に提案した震源パラメータ推定手法 (FAMT 解析) による精密地震パラメータ解析、(2) その

解析結果を用いた全波形トモグラフィーによる 2011 年東北沖地震の震源域における構造モデル改良に関する研究、(3) 南西諸島のトカラ列島群発地震の FAMT 解析、を進めることとした。

これらの地震波波形解析で必要となるグリーンテンソル波形は、沈み込み帯の不均質構造モデルを用いた大規模地震波シミュレーションによって生成する。この計算には独自に開発した手法 (HOT-FDM) を用いた。また全波形トモグラフィーで用いる感度カーネルの生成でも多数回の計算が必要である。本課題で TSUBAME-4.0 および不老 TYPE-I (FX1000) を利用することができたため、これらの大規模計算および多数回の計算を実行できた。

### 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。[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。[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。南西諸島域グループでは、構造モデル改良に向けた次の研究を行った。[3] 沖縄トラフにおける地震活動に FAMT 解析を適用して、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。[4] 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。

## 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

今年度はまず、全波形トモグラフィー解析に向けて海底地震計データを加えた FAMT 解析結果を追加した。利用したデータは日本海溝海底地震津波観測網（S-net）のものである。S-net は 2017 年 3 月に建設が完了した（Aoi et al. *EPS* 2020）。本研究では、陸上観測点（17 点）に加えて、対象地域である 2011 年東北沖地震の震源域にある 23 個の海底観測点の加速度計記録を使用した（図 1 参照）。

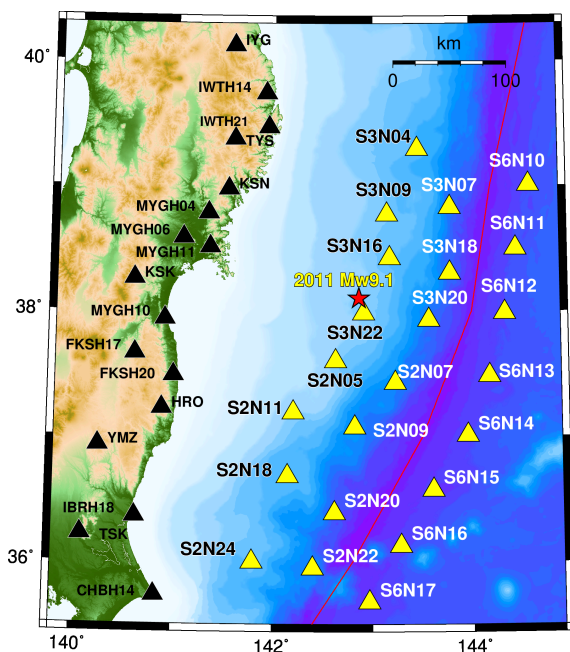


図 1 FAMT 解析および全波形トモグラフィーにデータを使用した観測点。黒三角は陸上地震観測網（F-net、KiK-net）、黄色三角は海底地震観測網（S-net）の観測点位置を示す。赤星印は 2011 年東北沖地震（ $M_W$  9.1）の震源（破壊開始点）を示す。

今年度は、海底地震計データを用いたこれまでの解析結果を見直して新たな地震も追加し、合計 12 個の地震の解析結果を得た（図 2）。また陸上観測点データのみを用いた地震 29 個についても再解析を行って解を更新した（図 2）。海底地震計データを用いた解析結果例を図 3 に示す。海底での観測地震波形が計算波形によって良好に再現されることが確認された。

そして、これらの新たな FAMT 解析結果をもとにして、合計 41 回（=29 個+12 個）の大規模フォワード計算を実施した。その計算パラメータを表 1 に示す。これらのフォワード計算結果は逆問題解析で使う感度カーネルの生成で利用する。

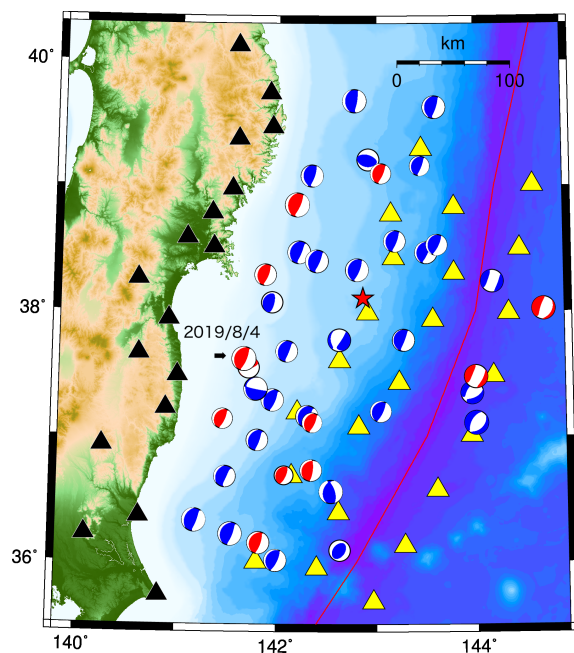


図 2 解析に用いた地震の Global CMT 解（www.globalcmt.org）。青いプロットは陸上データのみ地震（29 個）、赤いプロットは陸上データと海底データの両方を用いる 2017 年 4 月以降に発生した地震（12 個）。

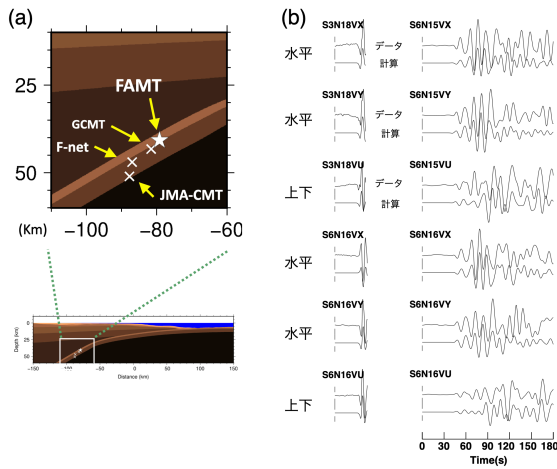


図 3 FAMT 解析結果の例。2019 年 8 月 4 日  $M_W$  6.4 の地震（震央は図 2 を参照）。(a) 3 次元構造モデル断面図に投影した最適震源位置（星印）。他のルーチン解析結果の位置も × でプロットした（GCMT: Global CMT 解 → 図 2、F-net: 防災科学技術研究所、JMA-CMT: 気象庁）。(b) 海底観測点における観測波形と計算波形の比較例。左列は周期帯 4–40 s のバンドパスフィルターをかけた P 波初動波形、右列は周期帯 10–40 s のバンドパスフィルターをかけた全波形。

表 1 東北沖領域の計算パラメータ

全格子サイズ	4864 × 3360 × 860
副領域サイズ	1216 × 1120 × 430
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	6
GPU 数	24
1 回あたり計算時間	5599 s (平均値)

### 5.1.2 全波形トモグラフィ

#### 分解能の検討

全波形トモグラフィ（逆問題解析）では、これまで 3 つのパラメータ（P 波弾性率、剛性率（= S 波弾性率）、密度）を同時に推定していた。この中で剛性率に関する行列要素が最も大きく、剛性率の分解能が他のパラメータよりも高くなる結果が得られていた。そこで今年度は剛性率のみを求めるように解析プログラムの改訂を行った。

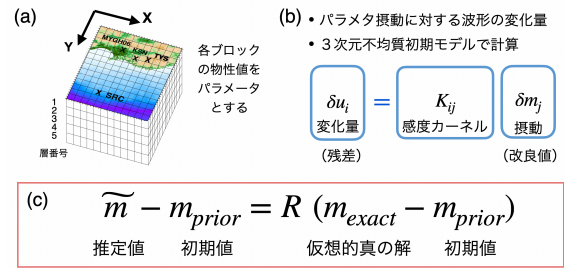


図 4 全波形トモグラフィの概念図。(a) ブロック分割の概念図。(b) 感度カーネルと改良値・残差の関係。(c) 分解能行列  $R$  の概念。

逆問題解析で利用する感度カーネル（図 4b）は相反定理に基づいて、観測点位置に力源（single force）を置いて計算した相反波動場と、震源位置にモーメントテンソルを置いて計算したフォワード波動場のコンボリューションによって得られる。本研究ではブロック分割を用いた逆問題解析を採用する（図 4a）。これらの設定のもとで、まず海底地震計データを加えた効果を調べるために分解能行列（図 4c）を求めた。図 5 は第 1 層（深さ 0–8.4 km）の剛性率摂動に関する分解能行列の対角成分である。この値が大きいほど分解能が高いと考えられる。陸上地震計データのみを使える地震だけで解析した場合（図 5a）と、海底地震計データと陸上地震計データの両方を使える地震を追加した場合（図 5b）を比較すると、相対的に図 5b の方が対角成分が大きくなっていることがわかる。このように海底地震計データを追加することによって剛性率に関する空間解像度が海溝付近の広域で改善することが見出された。このことは日本海溝でのトモグラフィ解析における海底地震データの有効性を示すものであると考えられる。

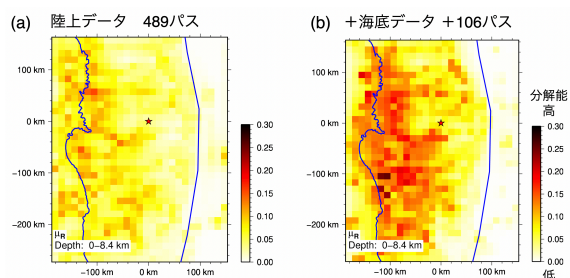


図5 第1層(深さ0–8.4 km)の剛性率摂動に関する分解能行列の対角成分の大きさをカラーで示したもの。(a) 陸上観測点データのみを用いる地震(図2の青色プロット)だけで解析した場合。(b) 海底観測点データと陸上観測点データの両方を用いる地震(図2の赤色プロット)の波形データを追加した場合。

### 逆問題解析の試行

これまでの検討をもとに、逆問題解析の試行を行った。図6に第1層と第2層の剛性率摂動の大きさを示す。2011年東北沖地震( $M_W$  9.1)において大きな断層運動があった領域を囲むように摂動量が大きい部分が分布している。特に震源域南側での摂動量(赤色)は大きい。これは Bassett et al. (2016) によって指摘された重力異常の境界と重なる(図6)。Bassett et al. (2016) は、この重力異常境界を密度構造の境界と解釈し、大規模な構造特性の違いが地震時の断層運動の空間分布に関係している可能性を指摘した。本解析でも同様の場所に摂動量が大きい領域が現れ、何らかの構造不均質の存在が示唆される。このような構造不均質の特徴と地震発生や震源過程との相関の可能性は重要な課題であり、今後も検討を続ける必要がある。なお本研究の現在のデータでは分解能が必ずしも高くはなく(図5)、第1層と第2層の摂動量に類似している部分がある。そのため本結果は暫定的なものであり、今後、地震データ数を増やした解析を行う必要があると考えられる。

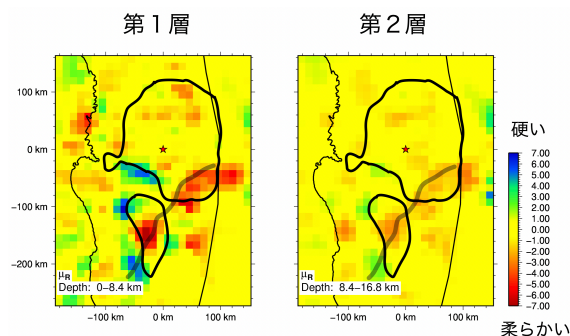


図6 第1層(深さ0–8.4 km)と第2層(8.4–16.8 km)の剛性率摂動量(%)。黒線で囲まれた領域は2011年東北沖地震で断層変位量が大きかった範囲(Iinuma et al. 2012)。グレーの線は大規模な重力異常の境界線(Bassett et al. 2016)。

## 5.2 南西諸島域パート：トカラ列島群発地震のFAMT解析

トカラ列島で2025年6月から7月にかけて群発地震が発生し、7月3日には悪石島で最大震度6弱を観測する地震があった。そして、この群発地震活動のために十島村の多くの住民が一時的に島外に避難する事態となった。このような社会的な影響の大きい事象であるが、この群発地震の詳細な全体像はまだ必ずしも把握できてはいないと考えられる。そのため本研究課題において急遽、この地域の群発地震の解析を実施することとした。

### 5.2.1 トカラ列島周辺を対象とした解析

まず今年度前半は理論グリーン関数の追加計算を行い、2021年と2025年に発生したイベントに対するFAMT解析を行った。トカラ列島周辺の領域( $320 \times 220 \times 80$  km)を対象とし、本課題以前(JHPCNでは2022年度課題)に計算したセントロイド震源の候補点に関して、観測点を追加計算するための大規模地震波シミュレーションを行った。候補点の深さの範囲は2–40 kmまでであり、島弧マントル最上部もカバーする。追加計算の対象となる観測点は防災科学技術研究所と鹿児島大学が南西諸島で

設置した臨時観測点のうち、トカラ列島周辺の計 3 点である (図 7)。

計算は表 2 に示すように格子間隔 100 m で 30001 時間ステップを行った。1 回あたりの計算時間は約 42 分で、1 観測点につき 3 回 (3 成分) 計算を実施した (表 2)。これらの計算では小松 (2018) の構造モデルを用いた。

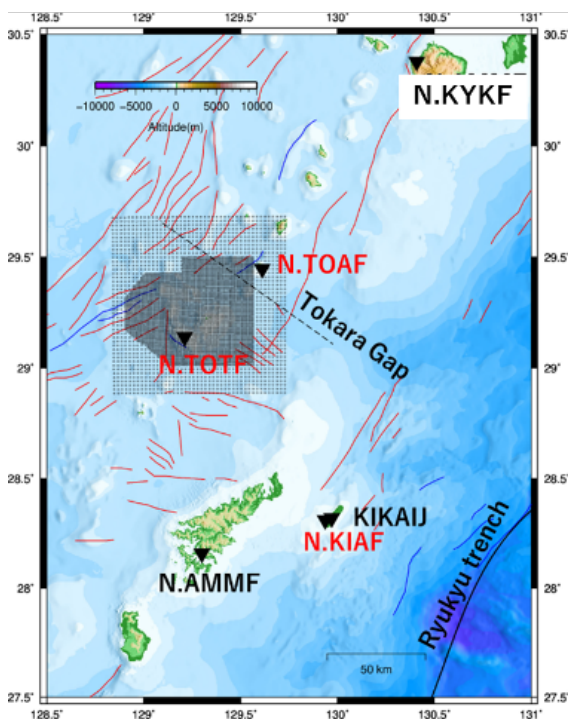


図 7 解析に使用した震源の候補点と観測点。黒点は震源の候補点、赤線と青線は海洋研究開発機構 (2016) による海底活断層 (正断層と逆断層)。赤文字で書かれた観測点が本研究課題でグリーン関数を計算した箇所を示す。

表 2 トカラ列島周辺を対象領域とした計算パラメータ

格子サイズ	3201 × 2201 × 801
格子間隔	0.1 km
時間間隔	0.005 s
時間ステップ数	30001 (150 秒間)
ノード数	216
プロセス数	864
スレッド数	12
計算時間	41.95 min (平均値)

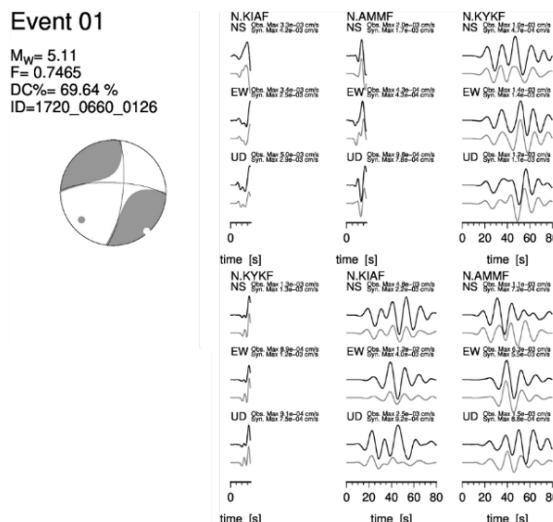


図 8 FAMT 解析における観測波形と理論波形の比較。観測波形を黒線、理論波形を灰色線で示す。

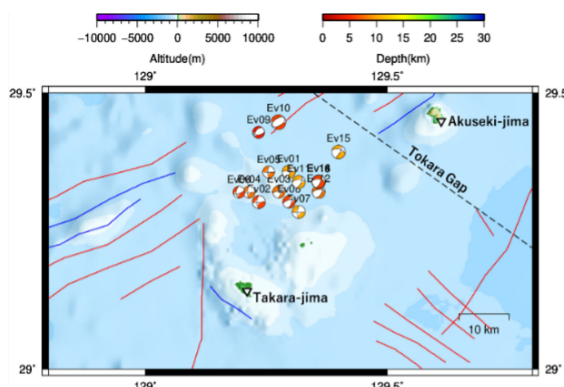


図 9 FAMT 解析で推定された震源とメカニズムの分布。赤線と青線は海洋研究開発機構 (2016) による海底活断層 (正断層と逆断層)。

そして、実際にトカラ列島で発生した地震について、計算したグリーン関数と観測波形を用いて FAMT 解析を行った。対象は 2021 年と 2025 年に発生した  $M_{JMA} \geq 4.5$  のイベントである。これらの地震について、震央距離が同程度である奄美大島と屋久島の F-net の 2 観測点 (N.AMMF および N.KYKF) と喜界島の観測点の波形記録を用いて FAMT 解析を行った。なお、喜界島の観測点は今回計算した臨時観測点 1 点 (N.KIAF; 2021 年の地震に使用)、気象庁 1 観測点 (KIKAIJ; 2025 年の地震に使用) を使用した (図 7)。解析した結果の一例

(2021 年の地震) を図 8 に示す。得られた最適震源位置の深さは 10 km であり、上部地殻内に位置する。これは気象庁震源よりも 10 km 以上浅い。グリーン関数から計算される理論波形は観測波形をよく説明している。全体で 16 イベントを解析し、横ずれ断層や正断層を含むメカニズムが推定された (図 9)。

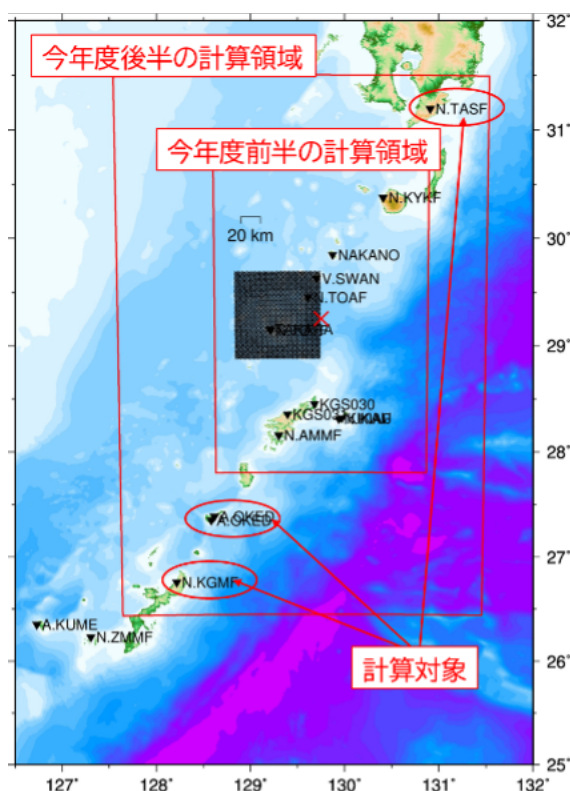


図 10 広域解析に使用した震源の候補点と観測点の分布。黒点は震源の候補点、赤丸で囲んだ観測点が今年度後半に広域計算によってグリーン関数を生成した箇所。

表 3 広域計算の計算パラメータ

格子サイズ	5601 × 3801 × 1001
格子間隔	0.1 km
時間間隔	0.005 s
時間ステップ数	40001 (200 秒間)
ノード数	768
プロセス数	3072
スレッド数	12
計算時間	65.90 min (平均値)

### 5.2.2 広域計算による解析

今年度後半は、対象とする観測点を増やして再度 FAMT 解析を試みた。それに伴い、計算対象範囲を拡大した広域計算領域を設定した。追加したのは、防災科学技術研究所と地震予知総合研究振興会が設置した 3 点である (図 10)。計算は表 3 に示すように格子間隔 100 m で 40001 時間ステップ行った。1 回あたりの計算時間は約 66 分で、1 観測点につき 3 回 (3 成分) 計算を実施した (表 3)。

今年度前半に FAMT 解析を行った地震を対象に、震源近傍の悪石島 (N.TOAF)、遠方の沖縄本島国頭 (N.KGMP) の各観測点を追加した再解析結果の一例を図 11 に示す (図 8 と同じイベント)。今年度前半に実施した、トカラ列島近傍の観測点だけを用いた解析よりも震源域に近い観測点と遠い観測点を加えたことにより、震源に対する観測点のカバレッジが向上することが期待される。しかし解析結果を検討すると観測波形と理論波形とのフィットには課題が残されており、構造モデルの再検討などを含めた継続的な検証が必要である。

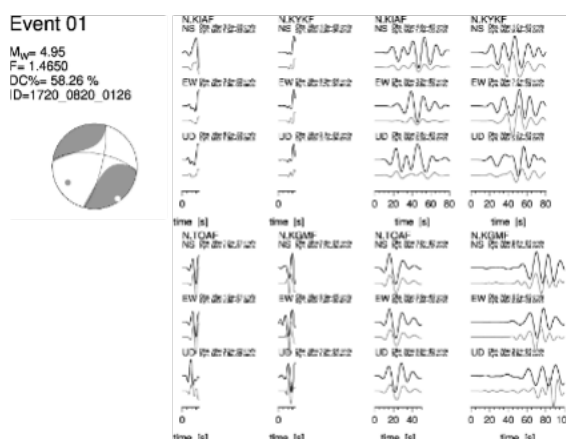


図 11 FAMT 解析による観測波形と理論波形の比較 (図 8 と同じイベントだが観測点異なる)。観測波形を黒線、理論波形を灰色線で示す。

## 6 進捗状況の自己評価と今後の展望

東北沖パートでは、陸上観測点データのみを利用できる地震と、海底観測点データも利用できる地震の両方について、再解析によって解析結果の確認を行い、信頼性が向上したと考えられる。さらに両方の地震タイプについて追加解析を行なうことによって、昨年度までよりもデータ数を増やすことができた。これらの結果に基づいて分解能行列の再検討を行い、海底観測点データの追加によって分解能が相対的に向上することが見出された。また全波形トモグラフィ（逆問題解析）を試行し、大規模な構造境界と不均質構造との関連の可能性も示唆された。しかし現段階のデータセットでは分解能の絶対値はまだ高くなく、地震データ数をさらに増やす必要があることも示された。このように全波形トモグラフィについては、当初の計画全般に関して一定の成果を得られたものの、精度向上に向けた課題が残されていると評価する。

南西諸島パートでは、トカラ列島周辺領域の候補点におけるグリーン関数波形を追加計算し、2021年と2025年に発生した16個のイベントについてFAMT解析を実施することができた。これらの解析結果を用いることによって、今後、波形解析が難しい小さな地震についても震源再決定を行うことが可能になるため、この地域の地震活動を理解するための基盤的な解析結果を得たと評価できる。

さらにトカラ列島群発地震の解析では、観測データを増やすために広域の大規模地震波シミュレーションを行ない、その計算結果にもとづくFAMT解析を実施できた。ただし波形フィットの面で継続的な検討が必要であると考えられる。そのため、データ数を増やすという意義のある成果が得られた一方で、広域計算については課題が残されていると評価する。