

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05535

研究課題名(和文) 陸海統合3次元構造モデルに基づく東北沖における地震波再現性と地震発生場の研究

研究課題名(英文) Study of accuracy of synthetic waveforms and earthquake occurrence site in and around the source area of the 2011 Tohoku-oki earthquake by using a land-ocean unified 3D structure model

研究代表者

岡元 太郎 (Okamoto, Taro)

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：40270920

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では計算地震波波形の精度を検証するために、東北地方太平洋沖地震の震源域で発生した浅い地震の解析を行った。計算地震波波形は、我々が提案したFAMT解析によって得られた最適地震パラメータを用いて生成した。その結果、推定された震源パラメータが構造モデルと整合的であることや、P波初動部分は周期4秒程度まで再現できるが、表面波を含む全波形については周期10秒程度以下の短周期で再現性が低下するなどの結果を得た。さらに海溝近くの浅い地震と陸域観測点との間での感度カーネルの計算を行い、感度の強い領域が屈曲した空間パターンを示すなど、構造モデル改良の上では3次元構造モデルの効果を考慮する必要性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震が発生した場所やメカニズムを推定するには地震波波形データが重要なデータとなる。一方で日本周辺の沈み込み帯は内部構造が複雑であるため地震波伝播にも大きな影響がある。これは地震解析の精度にも影響を及ぼすため、本研究では計算した地震波波形の精度を詳しく検討した。さらに地震波が構造モデルのどの部分に強く影響されているかを検討し、3次元構造モデルの効果などの構造モデルを改良する上での知見を得た。

研究成果の概要(英文)：We evaluate the accuracy of synthetic waveforms for small earthquakes in the source area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (MJMA 9.0) at the Japan Trench. We compute the synthetic waveforms on the basis of a land-ocean unified 3D structure model using our HOT-FDM. In estimating the source parameters, we apply FAMT method that we have recently proposed. We find that the FAMT solutions for events with shallow-angle thrusting mechanisms are located near the plate interface, which demonstrates the importance of using a 3D model. We find that the full waveforms with periods shorter than about 10 s are not well reproduced. At periods around 4 s, the initial body waveforms can be modeled, but the later surface waves are difficult to reproduce correctly. We further examine the 3D sensitivity kernels: for short-period wavefield (below around 10 s) we observe a curved pattern which cannot be predicted by 1D earth models. This indicates the effects of 3D heterogeneity.

研究分野：固体地球科学

キーワード：差分法 GPU 東北地方太平洋沖地震

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震(Mw9.1)は東日本地域に計り知れないほどの災害をもたらした。我々は地震波波形を用いてこの地震の破壊過程を研究する過程で、地震波波形の再現性の問題が重要になることに着目した。すなわちこの地震は、不規則な陸上地形・海底地形・海水層・堆積物層・沈み込むプレートなどから構成される強い3次元不均質構造を持つ沈み込み帯の中で発生している。この強い不均質性により、地震波は伝播経路が歪められるなどの大きな影響を受ける。この効果を考慮しない場合には、地震波波形を用いた破壊過程解析において誤差を生じる可能性も我々は示してきた。また、我々の予備的な研究により、既存の3次元構造モデルを用いた場合、海域の浅い地震からの周期12秒以上の地震波波形は、計算地震波によって良好に再現できるが、それ以下の短周期帯(短波長)周期帯では再現性が低くなることが分かってきた。これは海域の地震の破壊過程解析において短波長の現象の分解能に影響を与える可能性がある。これらのことから、海域を含めた3次元構造モデルのもとで大規模な地震波伝播シミュレーションを行うことによって計算地震波波形(グリーンテンソル波形)を生成して、その波形の精度を検討することが課題となっていると我々は考えた。

### 2. 研究の目的

上述の背景を詳細に検討し、予備的に行ってきた研究成果を発展させるために、この課題では地震波再現性(計算地震波の精度)の向上のための研究と、地震の物理パラメータを推定する研究とを行い、地震発生場の特性を考察することを目的とする。

### 2. 研究の方法

#### (1) FAMT(First-motion Augmented Moment Tensor)解析

上述のように、海域の浅い地震からの地震波波形には、3次元不均質構造の影響が強く現れる場合がある。通常使われる深さ方向のみに物性パラメータが変化する標準地球モデル(水平成層構造モデル)ではこの効果を再現することができない。さらに現状では地震観測点の多くが陸上に設置されているため、海域の地震を解析する場合には観測点が空間的に偏った分布になるという問題もある。そのような状況下において最適な震源パラメータを推定する手法として我々が提案したものがFAMT解析である(Okamoto et al. *EPS* 2017)。この手法は震源パラメータ推定において、表面波まで含む長周期の全波形に加えて、P波初動付近の短周期実体波波形をデータとして追加することが大きな特徴である。この追加によって初動走時や震源時間関数などの情報が増強される。さらに格子探索と組み合わせると、点震源の震源位置・発震時補正值・モーメントテンソル・震源時間関数からなる最適震源パラメータの推定が可能となる。本課題ではこの手法を計算地震波波形の精度の確認、および地震の物理パラメータ推定の両方で利用する。

#### (2) 波形の感度カーネルの計算

本課題研究では計算地震波波形の精度を確認するだけでなく、精度を向上させるための研究も行う。計算波形の精度を向上させるには3次元構造モデルを改良する必要がある。そのためには構造パラメータ摂動に関する波形の変化量を調べて、波形が構造モデルのどの部分に強い感度を持つのかを知る必要がある。この変化量を表すものが感度カーネルである。本研究では感度カーネルを検討することによって構造パラメータ改良に向けた検討を行う。なおこの感度カーネルも、大規模地震波シミュレーションによって得られる計算波動場からアジョイント法により計算する。

### 4. 研究成果

#### [1] 計算地震波精度の詳細な検討

1-1 FAMT解析 計算地震波波形の精度を詳細に検討するために、対象地域である東北地方太平洋沖地震の震源域で発生した浅い地震についてFAMT解析を適用した。解析対象としたのは海溝に近い2003年11月1日(Mw5.8)の地震とやや陸寄りの2007年12月25日の地震である(図1)。いずれも底角逆断層型のメカニズムを持つことからプレート境界型の地震であると考えられる。

これらの地震についてまずFAMT解析によって最適震源パラメータ(震源位置・震源メカニズム(モ

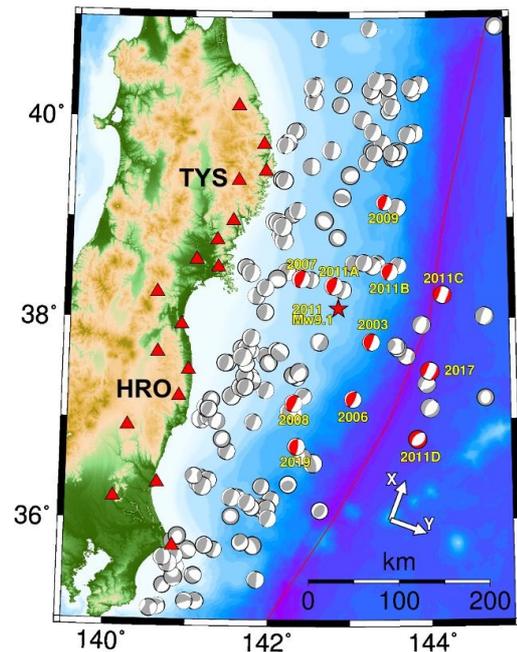


図1 解析対象領域。解析対象とした地震のGlobal CMT解は赤色で示した。背景には1996年1月1日から2019年10月31日までの地震のGlobal CMT解(6.4 Mw 5.7, 深さ60km以浅)をグレーで描いた。

ーメント・テンソル、震源時間関数)を推定した。その結果を図2に示す。FAMT解析では対象領域内での3次元探索に加えて発震時補正値も探索するので、4次元格子探索となっている。図2(a)と図2(b)には格子探索の結果得られた残差の空間分布図を示す。どちらの地震でもプレート境界に沿った部分で残差が小さく(色が赤く)なっている。図2(c)(d)には得られた震源位置を他の推定値とともに構造モデル断面図に投影した。今回のFAMT解析ではどちらの地震でもプレート境界近傍に最適震源位置が推定された。これは、これらの地震がプレート境界型のメカニズムを持つということと整合する。一方、他の推定結果を構造モデルに投影するとプレート境界から離れた場所に推定されている場合があり、地震自体のメカニズムと整合しないことになる。

地震発生場の状況を検討する上でも、また地震波を使って構造モデルを改良する上でも、地震発生場所の物性パラメータが重要である。本研究の結果は、地震のメカニズム・発生位置・構造モデルが自己無撞着的に整合するためには3次元構造モデルの効果が鍵になることを示す。

なお、我々の解析において短周期地震波を除外して長周期地震波波形だけを使って得られた震源位置も図2(c)(d)には示してある。これらはプレート境界からやや離れた位置に定まることから、FAMT解析において短周期波形を追加したことが意義を持つこともわかる。

1-2 計算波形の精度の検討 上記の解析により、前提とした3次元構造モデルのもとでの最適な地震パラメータ(最適震源位置・モーメントテンソル・震源時間関数・発震時補正)を推定できたので、これらの最適パラメータに基づいて計算波形を生成して観測波形と比較して検討した。図3は観測点TYSとHRO(図1を参照)について、異なる帯域のバンドパスフィルターをかけて、周期帯ごとの観測波形と計算波形を比較したものである。2003年(図3(a))、2007年(図3(b))のいずれの地震でも、周期10秒程度以上では表面波波形の振幅や位相などの観測波形の特徴が、計算波形によって良好に再現されていることがわかる。一方、周期10秒程度よりも短周期の波形では、波形の振幅や振動の継続時間などの観測波形の特徴が計算波形では再現し切れていない。これらの目視による検討結果を定量的に示したのが図3(c)、(d)である。これは観測波形と計算波形との間の規格化残差をバンドパスフィルターの周期帯ごとにプロットしたものである。振幅ゼロの波形の場合の規

図3 (a) 2003年の地震について複数の周期帯(上から2-4秒、4-40秒)で観測波形と計算波形を比較したもの。各波形ペアの上側が観測波形、下側が計算波形。(b) 2007年の地震に関する波形の比較。(c) 2003年の地震に関する周期帯ごとの規格化残差。(d) 2007年の地震に関する周期帯ごとの規格化残差。(Okamoto et al. 2018)

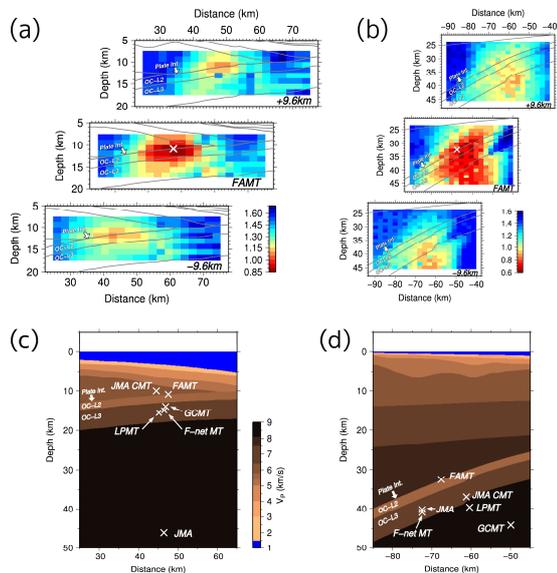
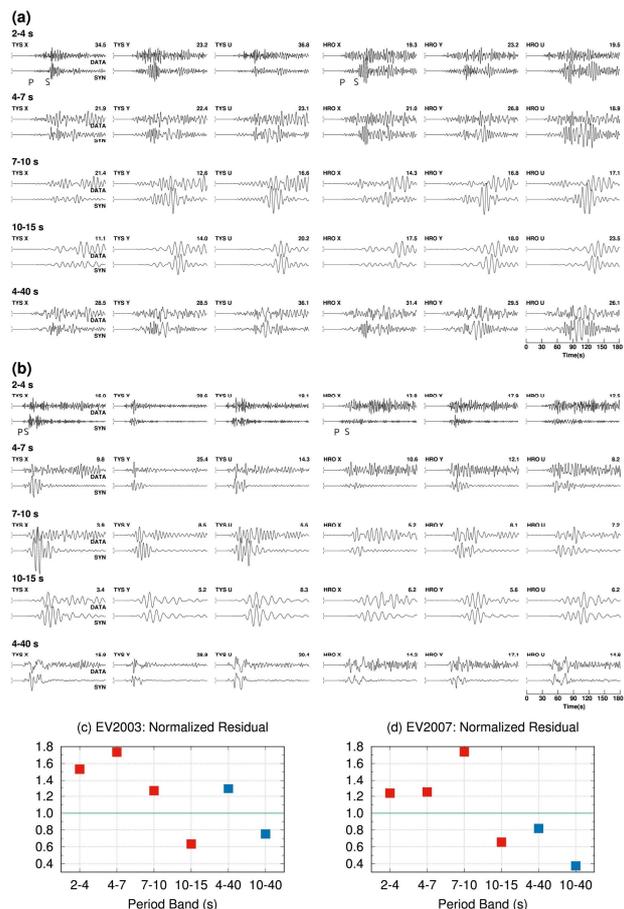


図2 (a) 2003年の地震についてFAMT解析の格子探索で得られた規格化残差分布。最適震源位置を通る断面(FAMTと記載)と、海溝に沿った距離9.8kmだけ離れた両側の断面での分布。最適震源位置を×印で示した。(b) 2007年の地震に関する同様の図。(c) 2003年の地震について構造モデル断面図にFAMT解析で得られた震源位置とその他の解析結果による震源位置を投影した図。GCMT: Global CMT解。F-net MT: NIEDのMT解。JMA-CMT: 気象庁のCMT解。LPMT: 本研究の方法で長周期波形のみを使った場合のMT解。JMA: 気象庁一元化震源。(d) 2007年の地震に関する同様の図。(Okamoto et al. 2018)



規格化残差が1であり、これよりも残差が小さいことが波形の良好度の目安となる。いずれの地震の場合でも、周期 10 秒以上の周期帯では規格化残差が 1 よりも小さく、計算波形が観測波形を良好に再現していることがわかる。逆に 10 秒以下の周期帯では規格化残差が 1 よりも大きく、波形の再現性が低下している。

これらの詳細な検討により、現状の 3 次元構造モデルでは波形全体の再現性は周期 10 秒程度以下では低下することがわかった。これは地震波波形を用いた破壊過程解析などにおいて、短周期（短波長）の現象に対する分解能や精度が低下する可能性を示唆する。つまり短波長の物理過程を詳細に探求するためには、3 次元構造モデルの改良が必要であることを意味する。

## [2] 地震の物理パラメータの推定

上記の結果を受けて、多くの地震について地震パラメータを推定することを試みた。これらのパラメータは感度カーネルの計算においても必要となるものである。

前項の計算では、2011 年東北地方太平洋沖地震の直後に構築した 3 次元構造モデルを用いた。その時点で参照した各種構造モデルは 2011 年以前に公開されたものであった。そこで本項では、2011 年以降に公開されて現在標準的に利用されている構造モデルである J-SHIS 深部地盤データ V2 (藤原・他 2015) 全国一次地下構造モデル (暫定版) (地震調査研究推進本部 2012; Koketsu et al. 2012) を利用して、これまで我々が用いてきた構造モデルをアップデートした。これらの他に地形モデル (Kisimoto 2000) も用いた。このアップデートした陸海統合 3 次元構造モデルを基にして、グリーンテンソル波形も全て計算し直した。

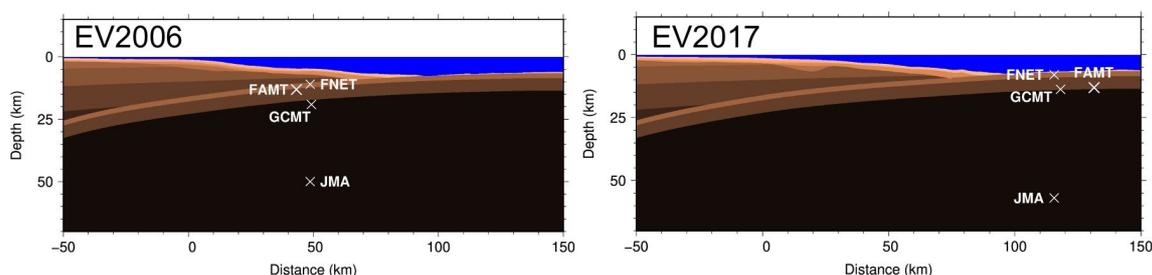


図 4 FAMT 解析結果の例。左) 2006 年 10 月 11 日 (Mw5.7) の地震について構造モデル断面図に FAMT 解析で得られた最適震源位置とその他の解析結果による震源位置を投影した図。GCMT: Global CMT 解。FNET: 防災科学技術研究所の F-net データを用いた MT 解。JMA: 気象庁一元化震源。右) 2017 年 10 月 6 日 (Mw6.2) の地震に関する同様の図。

解析対象とした地震は 11 個である (図 1)。これらに FAMT 解析を適用して得られた結果の例を図 4 に示す。2006 年の地震 (図 4 の EV2006, Mw5.7) は、2011 年東北地方太平洋沖地震の主要な震源域で発生した数少ない Mw6 程度の規模の地震の一つである。そのためこの地震のデータは東北地方太平洋沖地震の破壊過程や震源域の構造モデルを検討する上で重要なデータになると考えられる。FAMT 解析の結果、この地震の最適震源位置はプレート境界付近に推定され、地震のメカニズムと整合的であった (図 4 の EV2006)。また 2017 年の地震 (図 4 の EV2007, Mw6.2) はアウターライズの地震である。アウターライズ地震からの地震波は海溝を跨いで陸上観測点に届くため、次項の構造モデル改良の研究において沈み込み帯最浅部である海溝付近の分解能に関わるデータになると考えられる。この地震の FAMT 解析では、他の解析結果よりも更に海洋側に位置する最適震源位置が得られた。これはプレート内部の地震発生応力場の状況についての情報となり得るものであり、今後更に精密に検討する必要があると考えられる。

## [3] 構造モデル改良へ向けた感度カーネルの検討

本課題の研究により、東北地方太平洋沖地震の震源域である日本海溝では、周期 10 秒程度よりも短周期の地震波の再現性が低くなることが確認された。したがって短波長現象の解明を目指すには構造モデルの改良を行う必要がある。そこで本課題では構造モデルパラメータを改良する逆問題解析手法を検討する目的で、感度カーネルを計算して考察する。感度カーネルはモデルパラメータ (構造モデルの物性値) の摂動  $\delta m(x)$  に関する波形の変化量  $\delta u(\omega)$  を示すものであり、周波数領域でシンボリックに書くと  $\delta u(\omega) = \int_V K(x, \omega) \delta m(x) dV$  なる体積積分で表現される。この積分核  $K(x, \omega)$  が周波数領域での感度カーネルである。この感度カーネルの空間パターンは地震波が構造モデル中のどの部分に強く影響されているかを定量的に示すものであり、構造モデル改良の際に波動伝播の様子に関する重要な知見をもたらす。

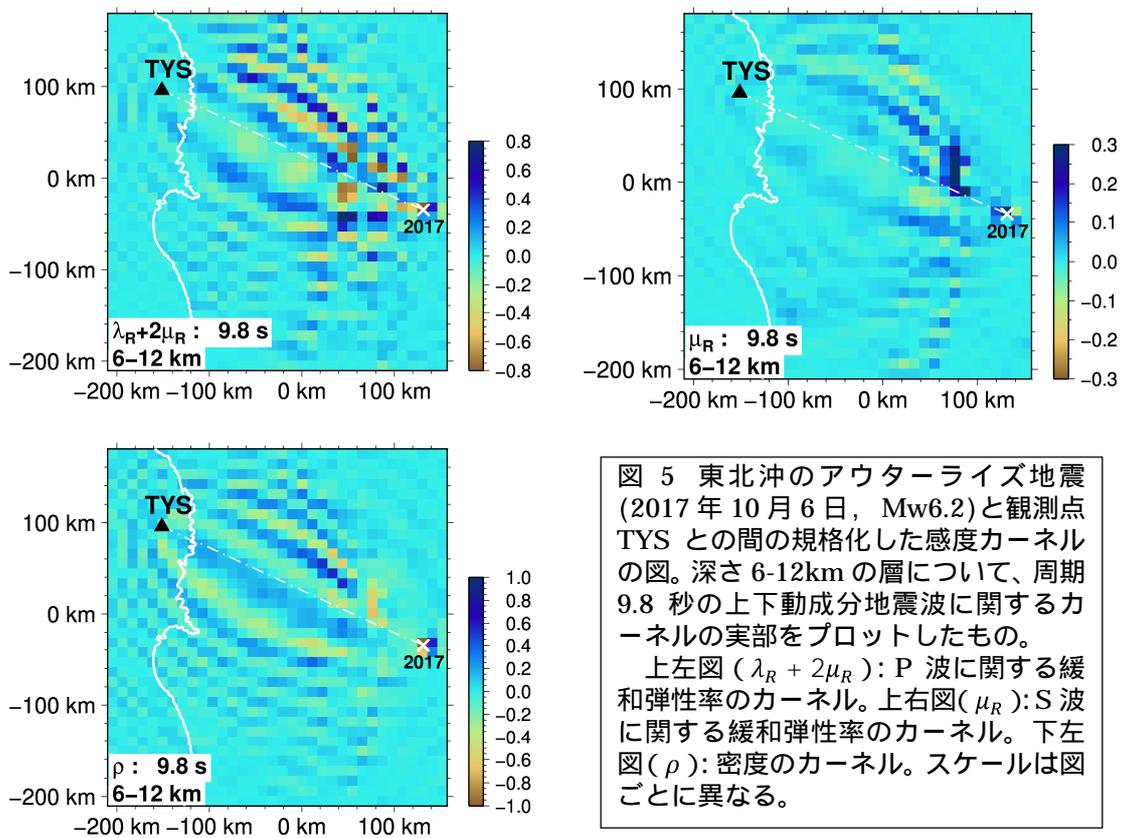


図 5 東北沖の OUTER-RAISE 地震 (2017 年 10 月 6 日, Mw6.2) と観測点 TYS との間の規格化した感度カーネルの図。深さ 6-12km の層について、周期 9.8 秒の上下動成分地震波に関するカーネルの実部をプロットしたもの。  
上左図 ( $\lambda_R + 2\mu_R$ ): P 波に関する緩和弾性率のカーネル。上右図 ( $\mu_R$ ): S 波に関する緩和弾性率のカーネル。下左図 ( $\rho$ ): 密度のカーネル。スケールは図ごとに異なる。

本研究では感度カーネルを波動論に基づいてアジョイント法で計算する。ここでは完全弾性体版の感度カーネル(Tanimoto 1990)を粘弾性体に拡張したものをを用いる。感度カーネルは、2つの弾性率・密度・ $Q_P \cdot Q_S$ (減衰の $Q$ 値)の5個の物性パラメータに関して求める。例として2017年10月6日に発生した OUTER-RAISE 地震(図1)と観測点 TYS との間での感度カーネルを図5に示す。密度のカーネル( $\rho$ )は直線経路に対して片側にやや屈曲した形になっている。また、P波に関する緩和弾性率( $\lambda_R + 2\mu_R$ )と、S波に関する緩和弾性率( $\mu_R$ )のカーネルも、直線経路に関して著しく非対称になっている。また、直線経路から外れる形で海溝に沿った地帯にも強い感度が現れている。これは震源が海溝の「外側」にあって震源から放射された波は海溝を跨いで伝播してくることから、水深が深く堆積物も厚い海溝付近の構造に波動場が強く影響を受けていることを表すと考えられる。

これらの結果から、周期 10 秒程度以下の周期帯では直線経路上の物性パラメータが波形に最も強い効果を及ぼすものであると単純に考えることはできず、波動論に基づいて構造モデルの改良を進める必要があることを示す。

#### [4] まとめと今後の課題

本課題では計算地震波波形の精度を検証するために、東北地方太平洋沖地震の震源域で発生した浅い地震の解析を行った。計算地震波波形は、我々が提案した FAMT 解析によって得られた最適地震パラメータを用いて生成した。その結果、推定された震源パラメータが構造モデルと整合的であることや、P波初動部分は周期 4 秒程度まで再現できるが、表面波を含む全波形については周期 10 秒程度以下の短周期で再現性が低下するなどの結果を得た。さらに海溝近くの浅い地震と陸域観測点の間での感度カーネルの計算を行い、感度の強い領域が直線経路に関して屈曲した空間パターンを示すなど、構造モデル改良の上では 3 次元構造モデルの効果を考慮する必要性が示された。なお、感度カーネルを用いた逆問題解析によって 3 次元構造モデルを改良すること、また改良した構造モデルを用いて精度を向上させた計算波形によって巨大地震の破壊過程を研究すること等に、今後の課題として取り組む必要がある。

謝辞 本研究では気象庁・防災科学技術研究所・Global CMT Project の地震パラメータを利用させていただきました。また、防災科学技術研究所の F-net, K-net, KiK-net の地震波形データを利用させていただきました。また、防災科学技術研究所・地震調査研究推進本部・岸本清行氏・中村武史氏からそれぞれ構造モデルを提供していただきました。記して感謝いたします。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka and Takeshi Nakamura	4. 巻 70
2. 論文標題 Evaluation of accuracy of synthetic waveforms for subduction-zone earthquakes by using a land-ocean unified 3D structure model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-018-0871-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岡元 太郎, 竹中 博士, 中村 武史
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka, Takeshi Nakamura
2. 発表標題 Waveform Tomography by Using The Adjoint Kernels Based on a Land-Ocean Unified 3D Structure Model For The Tohoku-Oki area of The Japan Trench, Japan
3. 学会等名 American Geophysical Union, 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡元太郎・竹中博士・中村武史
2. 発表標題 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FAMT解析
3. 学会等名 日本地震学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡元太郎・竹中博士・中村武史・青木尊之
2. 発表標題 大規模シミュレーションとアジョイントカーネルに基づく沈み込み帯での地震波伝播の考察
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岡元太郎・竹中博士・中村武史
2. 発表標題 東北沖の陸海統合3次元構造モデルに基づく波形トモグラフィーの試み
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	竹中 博士  (Takenaka Hiroshi)  (30253397)	岡山大学・自然科学研究科・教授    (15301)	