jh200059-NAH

大規模地震波シミュレーションを用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震の 震源域構造モデルの波形トモグラフィー

岡元 太郎 (東京工業大学)

概要 本課題研究の目標は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 今年度は、東京工業大学のTSUBAME3.0の GPUを利用した大規模計算結果をもとにして、 波形トモグラフィーで用いる「感度カーネル」の試行計算と検討を行った(§5.1)。感 度カーネルは物性パラメータ摂動に対する波形の変化量を定量的に表したものである。 計算の結果、感度カーネルの深さ方向の変化やパラメータごとの振る舞いの違い、周波 数依存性などの基本的な性質を明らかにして、波形トモグラフィー実施に向けた検討材 料を得ることができた。また我々は、GPU とは異なるアーキテクチャのもとでの計算手 法開発も進めている。本課題研究では、今年度新規に導入された名古屋大学の「不老」 スーパーコンピュータ Type-I サブシステムにおいて大規模地震波シミュレーションを 実施し、計算結果の確認や性能の考察など、今後本システムを利用していくうえでの基 本的な検討を行うことができた(§5.2)。

- 1. 共同研究に関する情報
- (1) 共同研究を実施している拠点名
 - 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
- (2) 共同研究分野
 - 超大規模数値計算系応用分野
 - ロ 超大規模データ処理系応用分野
 - ロ 超大容量ネットワーク技術分野
 - ロ 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

東京工業大学・理学	研究代表者·
院·岡元太郎	TSUBAME-3.0 での地
	震波シミュレーションと波
	形インバージョン
岡山大学·大学院自	副代表者・名大新システ
然科学研究科·竹中	ムでの地震波プログラム
博士	の開発・チューニング・
	検証計算
東京工業大学・学術国	GPU 計算の最適化、大
際情報センター・青木	規模並列化·計算結果
尊之	の可視化への助言
岡山大学·大学院自然	名大新システムでの地
科学研究科·小松正直	震波プログラムの開発・
	チューニング・検証計算

2. 研究の目的と意義

地震の震源物理や強震動生成メカニズムを探 るためには、計算地震波波形を用いた解析が必須 となっている。このとき計算地震波波形の精度が 不十分であると、解析結果にバイアスを生じたり、 分解能に制約を受けたりする可能性がある。我々 は、プレート沈み込み型の巨大地震である 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域において、たと え3次元構造モデルを用いて理論波形を計算し ても、周期10秒程度以下の観測地震波波形の再 現性が良くないことを見出した。これは波形計算 に用いた3次元構造モデルが十分ではないこと を示唆する。そこで本研究では全波形トモグラフ ィーによる東北地方太平洋沖地震震源域の3次 元速度構造モデルの推定・改良を行う。本研究の 特徴は、①初期震源パラメータの不確定さを最小 化するために独自の FAMT (First-motion Augmented Moment Tensor) 解析を用いること、② 構造パラメータ摂動に対する波形の感度カーネ 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、である。そして、最終的 にはこの改良した3次元構造モデルを用いて短

学際大規模情報基盤共同利用·共同研究拠点 2020 年度共同研究 最終報告書

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 に拡張することを目指す。

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、2011年東 北地方太平洋沖地震のようなプレート境界型の 巨大地震がしばしば発生する。このような巨大地 震の断層破壊過程や地震の震源分布・発震機構解 は、地震発生場の応力状態・物性や大規模構造と 関係すると考えられることから、地震の各種の解 析結果と不均質構造との相関関係を考察するこ とが地震発生場を理解する上で重要な手がかり となる。

これらの研究では地震波波形が重要なデータ となる。しかしプレート境界型地震が発生する 沈み込み帯は前述のように強い3次元不均質性 を持っており、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。この影響を考慮し ない場合には地震の解析結果にバイアスが発生 する可能性がある。我々は、この計算波形による 観測波形の再現性の問題に取り組んできた。そ の結果、既存の3次元構造モデルと最適震源モ デルを用いて計算波形を生成しても波形全体に ついては周期10秒程度以下の短周期帯での再現 性は低いことを見出した。これは現状の3次元 構造モデルの精度が数 10km 程度の波長域で充 分ではないことを示唆する。この計算波形の精 度限界のために、短波長現象である破壊現象の 考察や、地震発生場の短波長構造の考察におい ても現状では精度に限界があるのではないか、 と考えられる。

そこで、本研究では波形トモグラフィーによ って3次元構造モデルを改良し、周期数秒程度 の短周期帯での波形再現性を向上させることを 目的とする。本研究の意義は、短波長側が改良さ れた3次元構造モデルを提案できること、さら にその改良したモデルにより震源パラメータや 破壊過程の解析において短周期(短波長)側の精 度を向上させて、地震発生場と地球内部構造との相関関係を探る研究の短波長域への拡張を目 指すことができる、というものである。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要 新規課題のため該当せず。

5. 今年度の研究成果の詳細

本課題研究の目標は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。この目標に向けて今年度は、東京工業大 学の TSUBAME3.0 スーパーコンピュータの GPU

(NVIDIA P100)を活用した大規模計算により、波形トモグラフィーで用いる「感度カーネル」の試行計算と検討を行った(§5.1)。

また我々は、GPUとは異なるアーキテクチャの もとでの計算手法開発も進めている。本課題研究 では、今年度に新規導入された名古屋大学のスー パーコンピュータ「不老」を利用することとした。 「不老」は新たなプロセッサが用いられたシステ ムである。このシステムを利用するのは初めてで あることから、今年度は地震波シミュレーション プログラムの実行結果の確認や性能の考察など の基本的な検討を実施する(§5.2)。これは今後 このシステムで大規模計算を用いた研究を進め ていくための準備段階と位置付けられる。

5.1 波形トモグラフィーのための感度カーネルの 考察

感度カーネルとはモデルパラメータの摂動に 関する波形の変化量を示すものであり、下記の ような体積積分の積分核 $K_M(X, x, \omega)$ として表現 される。

$$\delta u(\mathbf{X},\omega) = \int \mathbf{K}_{M}(\mathbf{X},\mathbf{x},\omega) \left(\frac{\delta M(\mathbf{x})}{M(\mathbf{x})}\right) d\mathbf{x}$$

ここで $\delta u(X, \omega)$ は位置Xの観測点における波 形の周波数領域での変化量、M(x)は物性パラメ ータ、 $\delta M(x)$ はその摂動量をそれぞれ表す。この 感度カーネルが波形トモグラフィーにおける分 学際大規模情報基盤共同利用·共同研究拠点 2020 年度共同研究 最終報告書

解能(解像度)に関係する。そこで、感度カーネ ルの試行計算によって、その性質を詳細に検討 した。

5.1.1 対象地震と観測点

本課題研究では 2011 年東北地方太平洋沖地 震の震源域を対象とする。この対象地域に発生 した 19 個のマグニチュード 6 前後の中規模地震 を解析対象とした(表 1 および図 1)。また陸上 の観測点を選択してその観測データを利用した (図 1)。これらの地震に対して FAMT 解析(「2. 研究の目的と意義」を参照; Okamoto et al., 2017, 2018)を適用して震源位置・震源メカニズム・震 源時間関数の各パラメータを推定し、感度カー ネル生成の際にこれらのパラメータを利用した (§ 5.1.3)。



図1 対象地域で1996年1月~2019年10月に
 発生した浅い地震の Global-CMT 解(www.globalcmt.org)。赤でプロットしたものが解析対象地震(19個)。赤い三角は観測点の位置を示す(17点)。

ID	Date	Мw	ID	Date	Мw
EV2003	11/01/2003	5.8	EV2011C	03/24/2011	5.9
EV2004A	05/29/2004	5.8	EV2011D	03/30/2011	5.7
EV2004B	09/01/2004	5.7	EV2011E	05/05/2011	6.1
EV2006	10/11/2006	5.7	EV2011F	08/17/2011	6.2
EV2007	12/25/2007	6.1	EV2011G	08/22/2011	5.9
EV2008	07/21/2008	5.9	EV2011H	09/15/2011	6.2
EV2009	06/20/2009	5.3	EV2013	04/01/2013	6.2
EV2010	07/04/2010	6.3	EV2017	10/06/2014	6.2
EV2011A	03/09/2011	6.1	EV2019	03/10/2019	5.8
EV2011B	03/09/2011	5.9			

表1:解析対象地震のリスト(図1の赤いマーク)。

5.1.2 地震波シミュレーション

本研究では波動場のボルン近似に基づいて、 震源位置から広がるフォワード波動場と観測点 から広がる相反波動場 (アジョイント波動場) と を掛け合わせる方法により感度カーネルを生成 する。アジョイント波動場については 51 回、フ ォワード波動場については 19 地震について TSUBAME-3.0 を用いた大規模計算を実施した (表 2)。

全格子サイズ	4896×3456×900
副領域サイズ	544×576×454
格子間隔	150 m
時間ステップ数	35000
時間間隔	$0.007143 \mathrm{\ s}$
ノード数	27
GPU 数	108
シミュレーション回数	70回(=17×3+19)
1回あたり計算時間	5795 s(平均值)

表 2 アジョイント波動場およびフォワード波 動場計算のための TSUBAME-3.0 での計算パラ メータ。

計算にあたっては TSUAME3.0 の NVIDIA P100 GPUに演算ブロックサイズを最適化したプ ログラムを利用した。また本課題の計算では GPU1 基に一つの副領域を割り当てる。その際、 副領域サイズとして GPU のグローバルメモリ (16 GiB)のほぼ全てである 15.6 GiB を利用す るように設定した。

5.1.3 感度カーネルの考察

感度カーネルは地震の震源と観測点のペアに 対して定義される(5.1.1の積分式を参照)。ここ では2017年のアウターライズの地震 EV2017と 観測点 TYS を例として、代表的ないくつかの場 合における感度カーネルの特性を観察する(震 源位置と観測点位置は図1を参照)。

今回の検討では、対象領域を水平方向 10.8 km ×10.8 km、深さ方向 6 km のブロックで分割し、 各ブロック内でのカーネルの平均値をそのブロ ックでのカーネルの値として図示する。波形ト モグラフィーの逆問題計算においても、このブ ロック分割をそのまま利用することができる。



図2 ブロック分割の第2層目(深さ方向6-12 km) の観測点 TYS と震源 EV2017 のペアに関する P 波弾性率の感度カーネルの実部。水色は感度が ない(ゼロ)ことを示し、青または赤の色が濃い ほど感度が強いことを示す。左列は3次元構造 モデルに基づいて計算した感度カーネル実部、 右列は半無限構造に基づいて計算したものを示 す。上段は周期 10.2 秒の波に対する感度カーネ ル、下段は周期 7.1 秒の波に対する感度カーネル である。カラースケールは図ごとに異なる因子 で規格化したものであり、また、スケールは図ご とに異なっている。

3次元不均質構造の効果

まず3次元不均質構造が波動場に及ぼす効果 を見るために、半無限構造(平坦な自由表面を持 つ一様均質な媒質)の場合と比較する。図2に示 すように半無限構造モデルにもとづいて計算し た場合は感度カーネルは震源と観測点を結ぶ直 線経路に関してほぼ対称な空間パターンを示す が、3次元不均質構造モデルに基づいて計算し た場合には直線経路に関して非対称で、やや屈 曲したパターンを示す。これらは3次元付近異 質構造によって波動場や波の伝播経路が歪めら れていることに対応する。このような3次元不 均質性の効果は短周期(短波長)の波ほど顕著に なってくることもわかる(図2の下段)。」

2 深さ方向の変化

次に感度カーネルの深さ方向の変化を見る。 図 3 には①と同じ観測点・震源ペアに関する感 度カーネルを深さごとに描いた。 感度が強い(色 が濃い) 部分は 12 km よりも浅い部分に集中し ており、とくに最も浅い 0-6 km のブロックの感 度が強くなっている。これは、この例で震源とし て選択した EV2017 が浅い地震(深さ 13.1 km) であることを反映していると考えられる。浅い 地震の場合には表面波が卓越する。本解析では 感度カーネルの計算において全波形を用いてい るために、表面波が卓越する場合には結果的に 表面波の影響が大きく現れる。そのため浅いブ ロックにおける感度が強く表れていると考えら れる。このことから、深い層の構造モデルの改良 を効率的に進めるには、深い地震を用いたり、深 い場所を主に通過する波(実体波)だけを抽出し て感度カーネルの計算に利用したりするなどの 対応が必要になると考えられる。



図3 ブロック分割の第1~4 層目(深さ方向0-6 km、6-12 km、12-18 km、18-24 km)の各層ごと の周期7.1 秒の波に対するP波弾性率の感度カ ーネルの実部(規格化したもの)。3 次元構想モ デルに基づいて計算した。図2と同様に水色は 感度がないことを示し、青または赤の色が濃い ほど感度が強いことを示す。0-6 kmの図で白い 部分は、該当ブロック全体が海水で構成されて いることを示す。この検討では、海水は物性の不 均質性が小さいとみなして感度カーネル計算か ら除外している。カラースケールは4つの図に おいて共通の因子で規格化したものである。



図4 ブロック分割の第2層目(深さ方向 6-12 km) の観測点 TYS と震源 EV2017 のペアに関する3

次元構造モデルに基づいて計算した感度カーネ ル実部。右列はS波の弾性率(剛性率)、左列は 密度の感度カーネルである。上段は周期 10.2 秒 の波に対する感度カーネル、下段は周期 7.1 秒の 波に対する感度カーネルである。カラースケー ルは図ごとに異なる因子で規格化したものであ り、また、スケールは図ごとに異なっている。

③ パラメータによる違い

前と同じ観測点・震源ペアを用いた場合の、 P 波弾性率以外のパラメータに関する感度カー ネルを図 4 に示す。剛性率は3次元不均質性の 影響を受けやすく、直線経路に関する非対称性 が強く現れる。一方、密度は3次元不均質性の影 響がやや弱くなるようであるが、それでもやや 短周期(7.1秒)ではパターンの屈曲や非対称性 が顕著になってくることがわかる。

RMS 振幅の変化

波形に対する各パラメータの影響度が深さに よってどう変化するかを総合的に見るために、 深さ方向のブロック層ごとに感度カーネルの RMS 振幅値を求めた。図4と5にブロックの深 さに対する各パラメータの RMS 振幅値をプロッ トした。図4の RMS 値はブロック層が深くなる と急激に振幅が小さくなり、12 km よりも深いブ ロックでは RMS 値が浅いブロックの約 1/10 程 度以下になる。この現象は短周期ほど顕著であ る (図4の下図)。これらは②で述べた内容に対 応している。前述のようにこのケースでは表面 波が卓越し、今回の計算ではその表面波が主な 対象となることから浅いブロックの感度が卓越 するようになると考えられる。

一方、陸寄りの深い地震である EV2007 では 深いブロック層でも波形への影響度がある程度 保たれる(図5)。特に震源(深さ32.3 km)が位 置する層(上から7番目、30-36 km)は RMS 値 が大きくなっている。これは震源周辺の媒質に よる波形への影響が大きいことを示している。 このことから、深い場所に関する分解能を向上 させるためには、このような深い震源を解析に 積極的に導入する必要がある。

また、図4、5のいずれの場合でもS波弾性率 (つまり剛性率)の波形への効果が、P波弾性率 や密度の効果よりも大きいこともわかる。これ も、この計算では表面波が主な対象になってい ることと関係していると考えられる。また P 波 弾性率と密度の効果は同程度である。これらの 結果は、逆問題解析によってパラメータ摂動を 推定するうえではS波弾性率(剛性率)が主要な 対象になることを意味する。さらにパラメータ を加える場合には P 波弾性率と密度を同時に追 加しなければならない。



図 4 深さ方向の各層ごとに感度カーネルの
 RMS 振幅値を深さに対してプロットしたもの。
 観測点:TYS、震源:EV2017。MP: P 波弾性率
 (紫色)。MS:S 波弾性率(オレンジ色)。RHO:
 密度(グレー)。上図:周期 10.2 秒の波に関する
 グラフ。下図:周期 7.1 秒の波に関するグラフ。



図 5 震源を変更して図 4 と同様の RMS 振幅値 をプロットしたもの。観測点:TYS、震源:EV2007。

5.2 FX-1000 におけるプログラムの検討

我々は GPU とは異なるアーキテクチャのも

とでの計算手法開発も進めている。本課題研究 では新規に導入された名古屋大学のスーパーコ ンピュータ「不老」の Type-I サブシステム(Fujitsu PRIMEHPC FX1000)において地震波シミュレー ションプログラムの大規模計算を実施した。ま たその結果を、過去に Fujitsu PRIMEHPC FX100 で計算した結果 (2019 年度 JHPCN 課題)と比較 検討した。

本報告書では大規模計算の例として、鹿児島 県から沖縄県にかけての南西諸島を中心とする 全長 1000 km 以上におよぶ範囲を設定したもの を説明する(図 6)。

計算マシン	FX100	FX1000		
格子サイズ	$2201\!\times\!5501\!\times\!1001$			
格子間隔	0.002 度×0.002 度×0.2 km			
時間ステップ	30001			
時間間隔	0.01 秒			
ノード数	432	432		
プロセス数	864	1728		
スレッド数	16	12		
計算時間	7766 秒	4309 秒		

表3 FX100とFX1000の計算パラメータ

計算方法は地球の曲率の影響を考慮した quasi-Cartesian 座標における計算スキーム (Takenaka et al., 2017)を採用し,FX100で行っ た過去の計算と同一のノード数とした(表 3)。 計算対象とした地震は過去の計算と同じもので、 2008年7月8日16時42分に沖縄本島近海で発 生した深さ53km, M_{JMA}6.1の地震である。計算 には名古屋大学情報基盤センターの不老 Type-I システム(FX1000)を使用し,MPI と OpenMP によるハイブリッド並列計算を行った。

計算の際、プロセス数は1ノードあたり4個 (総計 1728 個)とした。これは FX1000 のプロ セッサ(A64FX)が内部的には12 個の演算コア (+1 個のアシスタントコア)及び HBM2 メモ リからなる Core Memory Group (CMG) で構成さ れていることによる。1 つのプロセッサには4個 の CMG が内蔵されており、CMG 間はリングバ スで結合されている。このようにプロセッサ内 部が4つのグループに分けられていることから、



図6 計算領域。灰色のハッチがかかった領域が 計算領域。逆三角形は観測点。震央とメカニズム を震源球で示す。破線は琉球海溝。

1ノード(=1プロセッサ)あたりのプロセス数 も4個とした。また1プロセスあたりのスレッ ド数は1つの CMG 内の演算コア数と同じ12個 とした。

表3に示したように、計算に要した時間を比 べると、FX1000ではFX100の約55%の計算時間 で計算を行うことができた。この計算で用いて いるのは時間領域有限差分法(Finite Difference Time Domain: FDTD)であり、メモリ律速の手 法となっている。そのためこの性能差はメモリ バンド幅の差(FX100:ノードあたり480GB/s、 FX1000:ノードあたり1024GB/s)が主要な原 因ではないかと考えている。また、計算結果(出 力波形)もFX100の場合とFX1000の場合とで 一致していることを確認できた(図7)。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

東北地方太平洋沖地震震源域の構造推定のパ ートでは、ほぼ予定通りの数の地震と観測点(そ れぞれ19個と17点)を選択して計算を実行す ることができた。しかし今年度は年度当初から 新型コロナ感染症が世界的に拡大し、この感染 症に対応するための業務等が大幅に増加した。 その結果、計算から得られる大規模な出力の整 理や、その出力にもとづく解析などの、時間を要



図7 N.YNGFにおける FX100(青線)と FX1000(赤破線)による計算波形の比較。フィルタはかけていない。左が波形全体図、(a)と(b)は左図の四角枠内をそれぞれ拡大表示したもの。

学際大規模情報基盤共同利用·共同研究拠点 2020 年度共同研究 最終報告書

する作業に遅延を生じた。そのためこのパート では、解析に用いる地震の震源パラメータを推 定する FAMT 解析の実施と、その結果にもとづ いて波形トモグラフィーのための感度カーネル を生成し詳細に検討するステージまでを実施す ることとした。波形トモグラフィーによって目 標とした構造モデル改良を試みることは継続課 題として次年度(2021年度)に実施する。その 際には今年度得られた知見に基づいて、解析対 象地震として深い地震を今よりも増やして深い 部分の物性パラメータをカバーできるようにす るなどの対応を追加する。

名古屋大学の「不老」Type-I サブシステム (FX1000)ではほぼ予定通りに大規模地震波シ ミュレーションを実施して、その結果の確認や 性能の考察を行うなど、基本的な検討を進める ことができた。

- 研究業績一覧(発表予定も含む. 投稿中・投稿予定 は含まない)
 - (1) 学術論文 (査読あり)
 該当なし。
 - (2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)
 - 該当なし。
 - (3) 国際会議発表 (査読なし)
 T. Okamoto, H. Takenaka, T. Nakamura, Toward short-period (< 0 s) full waveform tomography in and around the 2011 Tohoku-Oki source area using land-ocean unified 3D initial model, American Geophysical Uinon 2020 Fall Meeting, 2020 年 12 月 17 日.
 - (4) 国内会議発表 (査読なし)
 岡元太郎・竹中博士・中村武史, Toward short-period (< 0 s) full waveform tomography in and around the 2011 Tohoku-Oki source area using land-ocean unified 3D

initial model, 日本地震学会 2020 年秋 季大会, 2020 年 10 月 29 日.

- (5) 公開したライブラリなど 該当なし。
- (6) その他(特許, プレスリリース, 著書等) 該当なし。

参考文献

- <u>Hiroshi Takenaka</u>, <u>Masanao Komatsu</u>, Genti Toyokuni, Takeshi Nakamura and <u>Taro</u> <u>Okamoto</u>, Quasi-Cartesian finite-difference computation of seismic wave propagation for a three-dimensional sub-global model, *Earth, Planets and Space* (2017) 69:67. DOI 10.1186/s40623-017-0651-1
- Taro Okamoto, <u>Hiroshi Takenaka</u>, Takeshi Nakamura and Tatsuhiko Hara, FDM simulation of earthquakes off western Kyushu, Japan, using a land–ocean unified 3D structure model, *Earth, Planets and Space* (2017) 69:88. DOI 10.1186/s40623-017-0672-9
- Taro Okamoto, <u>Hiroshi Takenaka</u> and Takeshi Nakamura, Evaluation of accuracy of synthetic waveforms for subduction-zone earthquakes by using a land-ocean unified 3D structure model, *Earth, Planets and Space* (2018) 70:98. DOI 10.1186/s40623-018-0871-z