

13-NA29

## 沈み込み帯の巨大地震を対象とした 大規模並列地震波・津波伝播シミュレーション

竹中博士 (岡山大学)

**概要** 本課題では、差分法にもとづく大規模地震波シミュレーション手法と地震波・津波統合シミュレーション手法を利用して、海溝型巨大地震の研究に関する次の項目に取り組んでいる。(1) 3次元構造モデルの検証の高度化 (§3.2)：これまでに複数の場合について東工大 Tsubame-2.0 を用いた大規模並列 GPU 計算により摂動カーネルを求めて可視化を実施した。それらの結果に基づき 3次元不均質構造モデル内での短周期地震波の伝播の物理に関して考察を進め、論文を投稿した。(2) 東北地方太平洋沖地震の破壊過程 (§3.3)：破壊過程の逆問題解析の分解能や信頼度を検証するために、逆問題解析に関するシミュレーションを実施し、グリーンテンソル波形の違いが解析結果にどのように影響するかについて考察を行った。波形計算に用いる構造モデルを改良し、実データにもとづく破壊過程解析も進めた。(3) 地震波・津波統合シミュレーション (§3.4)：対象領域である南西諸島地域の 3次元構造モデルを用いて、東大 FX10 を用いた地震波・津波統合プログラムによる地震動計算を行った。

### 1. 研究の目的と意義

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (マグニチュード 9) は、強い地震動と巨大な津波によって東日本地域に計り知れないほどの地震災害・津波災害をもたらした。この地域ではマグニチュード 9 に達するほどの巨大地震が発生することはほとんど想定されていなかったため、この地震の詳細な断層破壊過程を明らかにし、巨大地震発生に至った過程や強震動・津波の生成メカニズムを考察することが重要な研究課題となっている。このことは、今後他の地域で発生するであろう同様の海溝型巨大地震によって励起される強震動や津波を評価することにもつながるため、防災上も重要な課題である。

我々はこのような課題に取り組むために大規模地震波・津波伝播シミュレーション手法 (時間領域差分法 FDTD: Finite-Difference Time Domain) の開発を行い、海溝型地震研究への応用を進めてきた。平成 24 年度の課題では、構造モデルの構築・検討と海溝型巨大地震のシミュレーションとを主な目的とした研究を実施した。平成 25 年度は新たに構造モデル改良手法の高度化 (波動場に関する摂動カーネルの計算)、東北沖地震の破壊過程の推定、地震波・津波の統合計算という項目を主な目的として研究を進めていく。

■ 共同研究を実施した拠点名  
 国立大学法人東京工業大学  
 国立大学法人東京大学

氏名	所属	役割
竹中博士	岡山大学・大学院自然科学研究科	研究代表者・プログラム開発と応用計算、全テーマの総括
青木尊之	東京工業大学・学術国際情報センター	副代表者・GPU 計算の最適化、大規模並列化、計算結果の可視化等
岡元太郎	東京工業大学・理工学研究	副代表者・プログラム開発と応用計算
中村武史	海洋研究開発機構	共同研究者・CPU 版プログラムの開発と応用
藤岡 慧	九州大学大学院理学府	共同研究者・構造モデル構築と地震波・津波計算
Toshiro Tanimoto	カリフォルニア大学サンタバーバラ校	共同研究者・摂動カーネルの計算と考察

### 2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した拠点名および役割分担

■役割分担

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

本研究では多数の GPU を用いた大規模並列計算によって地震波伝播のシミュレーションを行う。東京工業大学国際学術情報センターの TSUBAME-2.0 スーパーコンピュータは 2.4 ペタフロップスのピーク性能を有する、世界最高レベルの GPU クラスタである。そのため、本研究を進めていくうえで最適な環境を利用することができる。また、今後の京コンピュータ等のシステムの利用も想定して、東京大学の FX10 では CPU 版プログラムにより地震・津波統合シミュレーションを先行して実施する。

3. 研究成果の詳細

3.1 計算手法の概要

以下に本研究で用いる GPU 版プログラムの計算手法の概要を述べる。これらはこれまでの JHPCN 採択課題としての機会他を利用して開発してきたものである。詳しくは Okamoto et al. (2010; 2013) を参照されたい。FX10 で利用する CPU 版プログラムも、アーキテクチャに依存する部分以外は、ほぼ同様の方法を採用している。ただし FX10 で利用するプログラムには津波を表す項が追加されている。

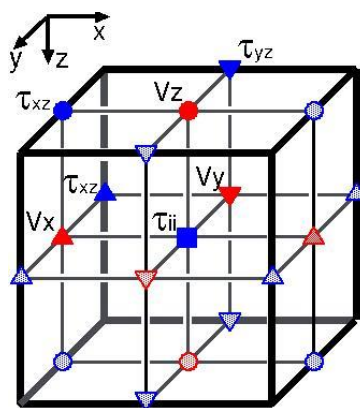


図 1 本研究で用いた食い違い格子と変数の配置。図示した格子は単位セルに相当する。

本研究では時間領域の差分法 (FDTD: finite-difference time domain) を用いる。この差分法では媒質の粒子速度 ( $v_i$  ( $i=x, y, z$ )) と応力 ( $\tau_{ij}$ ) とを変数として、図

1 に示す食い違い格子を用いて計算領域を離散化する。本研究で利用するプログラムでは、空間差分精度は 4 次精度とした。時間差分は 2 次精度とした。

本研究では NVIDIA 社の “GPU” (Graphics Processing Unit) を用いて計算を行う。GPU のアーキテクチャは通常の CPU (Central Processing Unit) とは異なっていることや、GPU がアクセラレータとしてホスト計算機に装着されることという特徴のために、計算性能を高めるための最適化を施している (Okamoto et al. 2010, 2013)。さらに、実用的な問題に応用するために、陸海地形と非弾性減衰の導入を施している。以下に最適化と実用計算のための実装について略記する。

・フル GPU 計算

差分法は memory intensive 型の計算であるため、GPU 内部のメモリ (グローバルメモリ) に差分法領域の変数全てを置いて GPU とホスト計算機との間の通信量を減らす。

・メモリ利用法の効率化

オンチップの高速な共有メモリとレジスタを陽に制御してグローバルメモリへのアクセスを低減する。

・3次元分割による並列計算

本研究で利用するプログラムでは、大規模並列化に適した 3 次元領域分割を採用し、副領域間の通信には MPI を用いる。

・GPU-ホスト間通信の効率化

本研究では袖領域通信に専用のメモリ領域 (バッファ) を用意して、袖領域内の不連続なメモリ並びを解消し通信の効率を高める。

・オーバーラッピング

通信と計算をオーバーラップさせることによって、副領域間の通信を実行している間に内部領域の計算を行い、計算効率を高めている。

・陸海地形効果の導入

陸海地形の効果をも時間領域差分法に取り込むスキームには我々自身が提案してきたものを利用する (岡元・竹中 2005; Takenaka et al. 2009; 中村・他 2011)。この手法を CPU 版と GPU 版の両方のプログラムに実装している。

・非弾性効果の導入

非弾性効果は線形の粘弾性として「メモリ変数」の方法により導入する (Emmerich and Korn, 1987)。本研究では、広い周波数帯域で一定の Q 値 (quality factor) を設定できるようにするために  $\tau$ -method (Blanch et al.

1995) を採用する。

### 3.2 3次元構造モデルの検証の高度化

3次元構造モデルの推定には高周波数極限である波線理論が利用されることが多い。しかし波形の再現を目標とする場合には、有限波長のもとでの波動現象を考慮して、地震波の波動場が媒質内部のどの点の影響を強く受けているかを考慮する必要がある。一方で、およそ 1Hz 以上の短周期地震波の伝播・散乱については、どの程度まで決定論的に再現できて、どの程度に統計的な要素を導入すべきかなどの点を地震科学はまだ十分に理解しているとは言い難い。そのため、建造物の被害にも関係してくる短周期地震波の 3次元構造内での振る舞いの考察には、3次元波動場の直接計算による詳細な考察が必要となる。

有限波長のもとで構造モデルを検証するための有力な定量的方法が、構造パラメータの摂動に対する波形の「感度」を調べる方法である (Tarantola 1984; Tanimoto 1990; Tromp et al. 2005 など)。この方法では、震源から順方向に伝播させた計算波動場と、観測点から逆方向に伝播させた計算波動場の両方を利用して Born 散乱近似に基づいて構造パラメータ摂動に関する Frechet 微分を計算し、理論波形の変化を求める。したがって、この方法は 3次元不均質構造を出発点として不均質構造内での波動場の様子を検討することができる。

例えば弾性定数のうちの剛性率の摂動  $\delta\mu$  に対する波形の変化  $\delta u$  は摂動に関する体積積分として次の式で表現される。なお、以下の式は全てフーリエ変換された周波数領域での式である。

$$\delta u_i = \iiint K_\mu^i \delta\mu dV \quad (1)$$

ここで積分カーネル  $K_\mu^i$  は次のように表現される。

$$K_\mu^i = -2 \left( E_{xx}^i e_{xx} + E_{yy}^i e_{yy} + E_{zz}^i e_{zz} + 2E_{xy}^i e_{xy} + 2E_{yz}^i e_{yz} + 2E_{xz}^i e_{xz} \right) \quad (2)$$

ただし  $E_{kl}^i$  は観測点側にかけた  $i$  方向の力源による波動場から計算した歪み場を表す ( $k, l = x, y, z$ )。同様に  $e_{kl}$  は震源からの波動場をもとにして計算した歪み場を表す。

この積分カーネル  $K_\mu^i$  が大きい場所では構造

パラメータ摂動による波形の変化 (摂動) が大きくなり、小さい場所では構造パラメータ摂動による波形の変化が小さくなる。したがって、積分カーネルを調べることにより、波動場が 3次元不均質構造モデル内のどの部分の影響を強く受けているかを定量的に考察することができる。さらに、(1)式を逆問題として定式化すれば、観測波形と理論波形の残差 ( $\delta u$ ) から構造パラメータの改善量 ( $\delta\mu$ ) を求めることも可能となる。

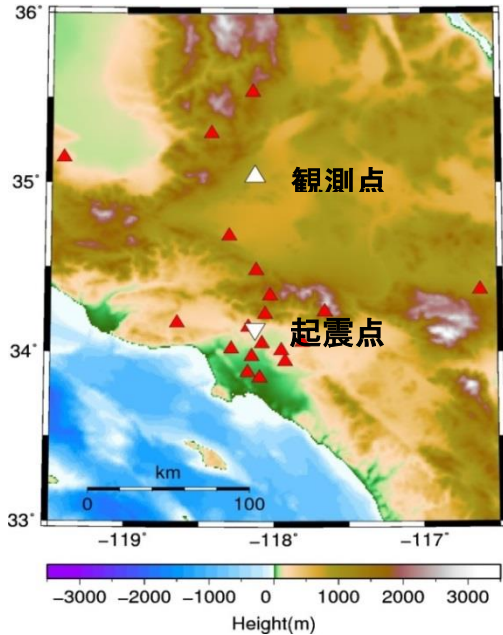


図 2 対象領域 (南カリフォルニア)。▽が起震点を示す。△がカーネル計算のために仮想的に置いた観測点の例 (距離 100 km) を示す。

3次元不均質構造モデルを初期モデルとして短周期波動場の Frechet 微分について考察する試みとして、我々は南カリフォルニア地域を対象とした研究を進めている (Tanimoto and Okamoto, SSA 2013 ほか)。この研究では、ビルを長時間振動させるという非常にユニークな人工震源によって得られた膨大な観測地震波データを利用して、震源自体の複雑性をほぼ排除した形で短周期波動の伝播・散乱を考察することが可能となる。このことが、3次元構造と波動伝播との関係を研究するケーススタディとして、(東日本地域ではない) 南カリフォルニア地域に関する検討を行うこととした理由である。

図 2 には対象地域を、図 3 には起震点・観測点のペアにおける剛性率摂動に関する SH 波形の感度カーネル断面例を示す。地表面近くで大

きな振幅を持つ部分は表面波に起因する部分であると考えられる。モホ面（図 3 の下図で濃い茶と淡い茶の境界面）付近まで達する実体波の経路も現れているが、相対的な振幅は小さく、波形の大部分は表面波の影響のもとにあることがわかる。

このようにして摂動カーネル（Frechet 微分）を計算することにより短周期波動の伝播経路と、場所ごとの波形への影響度に関する定量的な考察を進められる。また同時に、先述のように、構造モデルを改良するときにもこれらの摂動カーネルを利用することができる。

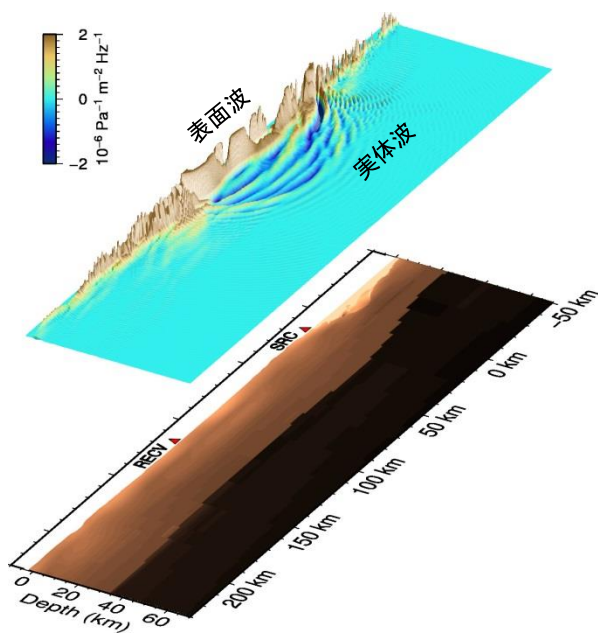


図 3 (上)起震点と仮想観測点を通る鉛直断面で見た剛性率カーネル実部の大きさ。対象周波数は 1.13 Hz である。(下) 同じ鉛直断面での P 波速度構造 (色が濃いほど P 波速度が大きい)。

なお、表 1 には、構造パラメータ推定の研究においてこれまでに行った計算例をまとめた。これらは TSUBAME-2.0 を用いて計算したものである。

これらの計算結果と、別途のデータ解析結果をもとに、この地域での短周期地震波の伝播について考察を進め、論文を投稿した。

### 3.3 東北地方太平洋沖地震の破壊過程

この項目では東北地方太平洋沖地震の逆問題解析によって破壊過程の推定を行い、食い違い量の詳細な分布等を考察することを目的とする。これまでに下記の計算や解析を行った (岡元・他、地震学会 2013 年秋季大会ほか)

パラメータ等	値
格子サイズ(1)	4160×2560×1040
格子サイズ(2)	4160×2560×1248
格子間隔	80 m
時間ステップ	30000
時間間隔	0.004 s
GPU 数(1)	520
GPU 数(2)	624
ノード数(1)	174
ノード数(2)	208
計算時間	12828-14094 s
出力ファイル(1)	150 GB ×5 ケース
出力ファイル(2)	1.5 TB ×3 ケース

表 1 計算パラメータ。2 種類の計算(1)(2)でパラメータや計算時間、出力ファイルサイズ等が異なる。計算時間は TSUBAME-2.0 の M2050 を利用した場合のものである。

#### (1) 構造モデルの相違によるグリーンテンソル波形の違いの検討

本研究では海域を含む東日本地域の 3 次元構造モデルを用いて陸上で観測された強震動波形のグリーンテンソル波形を計算する。一方、これまでの多くの解析では、水平方向には均質で深さ方向にのみ物性が変化する 1 次元構造モデルに基づくグリーンテンソル波形が使われている。そこで、グリーンテンソル波形の違いが、解析結果にどの程度反映されるかを検討するために、1 次元構造モデルを用いた強震動グリーンテンソル波形の計算を行い、3 次元構造モデルによる波形との比較検討を行った。1 次元モデルによる計算には武尾 (1985) のプログラムを利用させていただいた。構造モデルには Wu et al. (2008) のものを利用した。

図 4 に計算グリーン関数波形の例を示す。これは断層モデルにおいて震央を通り陸側から海溝付近にまで達する線上 (図 5) に単位震源を置き、それらの単位震源から放射される地震波波形に相当する。3 次元構造モデルと 1 次元構造モデルによる波形の違いは震央付近よりも海側で著しい。波形の主要部分 (表面波) の群速度の違いによる到達時間の相違や、分散性の違

いによる波形の違いが顕著である。津波波形解析などにより、東北地方太平洋沖地震は海溝寄りのすべり量が大きかったとされていることから、図 4 に示されたようなグリーン関数波形の違いは地震波による解析結果に影響を及ぼす可能性がある。

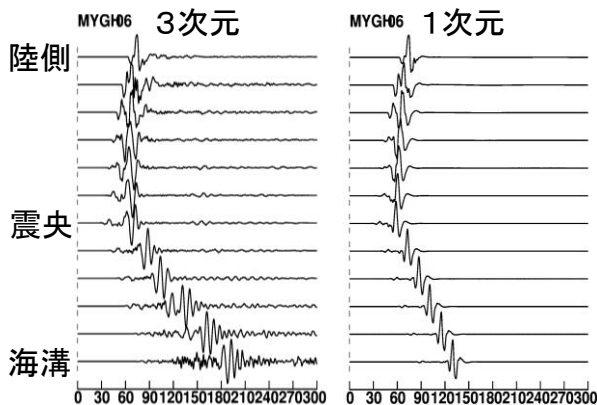


図 4 観測点 MYGH06 (宮城県田尻) におけるグリーン関数 (計算強震動波形、上下動速度成分)。左側が 3 次元構造モデルによる計算波形、右側が 1 次元構造モデルによる計算波形である。

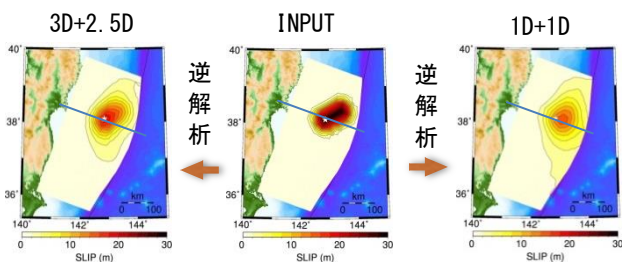


図 5 逆問題解析のシミュレーション。INPUT: 断層面上に仮定したすべり量分布。3D+2.5D: 3 次元構造モデルに基づいて計算した強震動グリーンテンソル波形と 2.5 次元構造モデルを用いて計算した遠地実体波グリーンテンソル波形とを用いて逆解析したもの。1D+1D: 1 次元構造モデルに基づいて計算した強震動グリーンテンソル波形と 1 次元構造モデルを用いて計算した遠地実体波グリーンテンソル波形とを用いて逆解析したもの。

## (2) 逆問題解析のシミュレーション

グリーンテンソル波形の違いによる解析結果への影響を検討するために、逆問題解析のシミュレーションを実施した。この解析ではデータとして東日本地域における強震動波形 (3 成分速度成分) と、世界各地で得られる遠地実体波波形 (上下動変位成分) とを用いる。

破壊過程解析のシミュレーションでは、不均質構造 (強震動波形については 3 次元構造モデ

ル、遠地実体波波形については 2.5 次元構造モデル) を用いて計算したグリーンテンソル波形とすべり量の仮定分布とを使って理論波形データを生成し、その波形を「理論データ」とみなして逆解析を行う。

図 5 にその結果を示す。理論データ生成に用いたグリーンテンソルと同じ波形を使っても、逆問題は非線形であり拘束条件 (平滑化条件) も含むため正解には戻らず、いくらか「にじんだ」解が得られる (図 5 の 3D+2.5D)。しかし得られた解は仮定したすべり分布と同様に震央に関して非対称な (やや傾いた) パターンを示す。一方、1 次元グリーンテンソル波形を用いた逆問題解析では、得られた解は震央に関して対称な分布に近づいている。さらに、海側まですべり分布が伸びており「にじみ」が著しく、海側での分解能が低くなっていることが示唆される。このような解の違いには、図 4 に示したようなグリーンテンソル波形の違いが反映されていると考えられる。

図 5 は一例のみとなるが、このような解析を複数の例について検討することによって、分解能や解の信頼性についての知見を得ることができると考えており、同種のシミュレーションを継続して行う予定である。

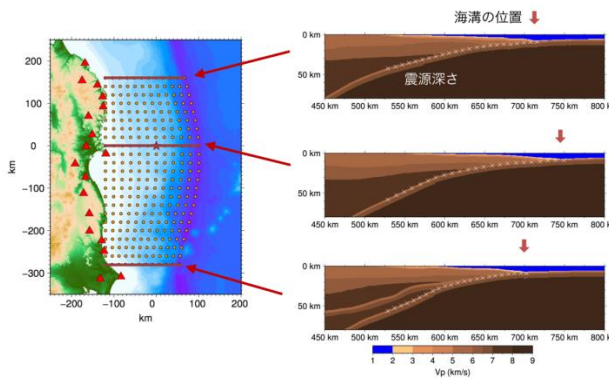


図 6 岡元・他 (2014) が作成した、遠地実体波計算に用いる 2.5 次元構造モデル (鉛直断面図)。これらの断層格子点の 23 測線に沿った 23 個の構造モデルを用いて観測点数×構造モデル=31×23=713 回の波形計算を新たに行った。海溝に沿って海溝位置が変わることや震源深さが変わるなどの 3 次元性が考慮される。

## (3) 構造モデルの改良

本研究では近地強震動波形データと遠地実体波波形データの 2 種類のデータを同時に用いて逆問題解析を行う。このうち遠地実体波のグリーンテンソル波形の再計算を実施した。この波

形計算では岡元・他（日本地球惑星科学連合大会、2014）が構築した新たな 2.5 次元構造モデルを用いた。これは断層格子点に沿った複数の異なる構造モデルからなり、海溝の構造の 3 次元性を考慮したものである（図 6）。これは陸海統合 3 次元構造モデルの断面を切り出したものであり、2 種類のデータで構造モデルを統合できたことにもなる。

(4) 破壊過程の逆問題解析

実際の観測データを用いることによる、東北地方太平洋沖地震の破壊過程解析も、上のシミュレーションと並行して進めている（岡元・他、地震学会 2013 年秋季大会発表ほか）。これについては、結果がまとまった段階で報告する予定である。

3.4 地震波・津波統合シミュレーション

海溝付近で発生する巨大地震による災害を考えるうえで、地震波伝播とともに津波の生成や伝播を検討する必要がある。そのため我々は地震波・津波を統合する方程式を新たに作成し、その方程式を実装した差分法計算手法を開発してきた（Takenaka et al. 2012）。これは同一の 3 次元構造モデルと同一の震源モデルのもとで、地震波と津波の生成と伝播を同時に扱い、物理的に統合した計算を行うものである。そのため、地震波と津波励起や伝播との関係を定量的に曖昧さを排して考察できるようになると考えられる。

昨年度は手法の開発と検証という側面の計算として、日向灘における地震動・津波統合シミュレーションを実施した（竹中、JHPCN 2012 年報告書）。今年度は島嶼地域の強震動と津波を検討・評価する目的で、南西諸島地域を対象にしたシミュレーションを計画した。この計算には東大の FX10 を利用することとした。

格子サイズ	801×801×501
格子間隔	250 m
時間間隔	0.0125 s
時間ステップ数	8000

表 2 図 7 の地震動シミュレーションに関する計算パラメータ。

計算結果の一例として、ここでは南西諸島のうち奄美諸島周辺を対象とし、津波項を抑止して地震動のみの計算を実施した計算例の地震波伝播スナップショット断面を示す（図 7）。計算パラメータは表 2 にまとめた。この計算には藤岡・他

（日本地球惑星科学連合大会、2014）で構築された 3 次元構造モデルを利用した。

なお、東大 FX10 の利用状況が非常に混雑していたために、今回は 100,000 ステップ程度の長時間ステップを必要とする地震波・津波統合シミュレーション・ジョブを実施することはできなかった（ジョブが実行されなかった）。今後、3 次元構造モデルを用いた統合シミュレーションを継続していく予定である。

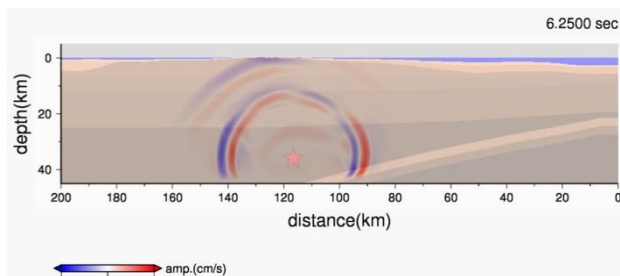


図 7 東大 FX10 を利用した地震動のシミュレーション例（構造モデル断面図に投影した地震波スナップショット）。星マークが震源位置を示す。

3.5 当初計画の達成状況について

(1) 3 次元構造モデルの検証の高度化

§ 3.2 に記載したように、これまでに複数のケースについて摂動カーネルの計算と可視化を実施し（図 2, 3 および表 2）不均質構造中の短周期地震波伝播と 3 次元構造モデルとの関係について複数の学会発表等を行った。中間報告以後に、これらの計算結果と別途のデータ解析結果をもとにして、この地域での短周期地震波の伝播について考察を進め、論文を投稿した（Tanimoto & Okamoto）。その中では既存の構造モデルでは観測された短周期波動場の特徴を完全には再現できていない可能性も指摘できた。当初目的をほぼ達成できたと考える。

(2) 東北地方太平洋沖地震の破壊過程

これまでに 1 次元構造モデルのグリーンテンソル波形計算や逆問題解析のシミュレーションを行い、複数の学会発表等を行ってきた（§ 3.3(1)(2)）。中間報告以後に、遠地実体波データのグリーンテンソル関数波形を計算するための構造モデルを大幅に更新し、700 回以上の再計算によってグリーンテンソル波形を再構築した（§ 3.3(3)）。これらの波形によって逆問題解析も進めている。当初目的をほぼ達成したと考える。

(5) 地震波・津波統合シミュレーション

§ 3.4 に記載したように、対象領域（南西諸

島) の 3 次元構造モデルにもとづいて、東大 FX10 を利用して地震動シミュレーションを行った。ただし FX10 が混雑していたため、長時間計算を必要とする津波項を抑止した計算にとどまった。今後、津波項を有効にした計算と研究を継続する予定である。

#### 4. 今後の展望

短周期波動の伝播に関する考察では、対称地域について現状の 3 次元構造モデルは観測を完全には再現できていない可能性を示唆できた。今後、ランダムな散乱構造を含むような、より複雑な地球内部構造モデルを検討する必要があるだろう。

東北地方太平洋沖地震の破壊過程解析については、実際のデータを用いた破壊過程解析も進めており、学会発表等も行ってきた。これについては論文発表との関係もあるため、結果がまとまってから報告することとしたい。

地震波・津波統合シミュレーションについては、3 次元構造モデル・震源モデル・津波励起と伝播の関係性を定量的に考慮していく予定である。

#### 5. 研究成果リスト

##### (1) 学術論文

Tanimoto, T. and Okamoto, T., The Millikan shaking experiments and high-frequency seismic wave propagation in Southern California, *Geophysical Journal International*, submitted. (投稿中)

藤岡 慧、地震動予測のための南西諸島の 3 次元地下構造モデルの構築とその適用、九州大学大学院理学府、地球惑星科学専攻、修士論文、2014 年 2 月。

##### (2) 国際会議プロシーディングス

Takeshi Nakamura, Hiroshi Takenaka, Taro Okamoto, and Yoshiyuki Kaneda, Seismic wave simulation at DONET ocean-bottom stations, *Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium*, Yokohama, Japan, 18-21 November 2013: pp. 485-488. doi: 10.1190/segj112013-122, 2013. (2013 年 11 月 18 日)

##### (3) 国際会議発表

Tanimoto, T. and Okamoto, T., High-Frequency Seismic Waves generated by Building-Shaking Experiments and Surface Wave Group Velocity Estimates from the Cross-Correlation of Data, Abstract S13B-06 presented at 2013 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 9-13 Dec,

2013.

Tanimoto, T. and Okamoto, T., Understanding high-frequency seismic waves generated by building shaking, *Wave propagation through the Earth's interior*, Wuhan, China. 2013 年 5 月。

Tanimoto, T. and Okamoto, T., High-Frequency Monochromatic Oscillations in the Los Angeles Basin and Numerical Simulation., *Seismological Society of America Annual Meeting*, Salt Lake City, Utah, USA. 2013 年 4 月 18 日。

##### (4) 国内会議発表

岡元太郎、大規模並列 GPU 計算による地震波伝播シミュレーション、日本計算工学会第 6 回 S&V(Simulation & Visualization) 研究会、東京都文京区、2013 年 11 月 26 日。

岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之、3 次元グリーンテンソル波形による 2011 年東北地方太平洋沖地震の破壊過程 (2)、日本地震学会 2013 年秋季大会、P1-62、神奈川県横浜市、2013 年 10 月 7 日。

岡元太郎・竹中博士・青木尊之、地震学における大規模・高性能 GPU 計算、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、STT59-03、千葉県幕張市、2013 年 5 月 20 日。

岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之、3 次元グリーンテンソル波形によるインバージョンで推定した 2011 年東北地方太平洋沖地震の破壊過程、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、SSS28-09、千葉県幕張市、2013 年 5 月 23 日。

藏本稔大・藤岡慧・竹中博士・中村武史・岡元太郎、日向灘における巨大地震の地震動と津波の統合シミュレーションに向けて、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、SSS35-17、千葉県幕張市、2013 年 5 月 23 日。

##### (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等) 該当なし。

#### 参考文献

Blanch, J. O., J. O. A. Robertsson, and W. W. Symes, Modeling of a constant Q: Methodology and algorithm for an efficient and optimally inexpensive viscoelastic technique, *Geophysics*, **60**, No.1, 176-184, 1995.

Emmerich, H., and M. Korn, Incorporation of

- attenuation into time-domain computations of seismic wave fields, *Geophysics*, **52**, No.9, 1252-1264, 1987.
- 藤岡 慧・竹中博士・山田伸之・中村武史・岡元太郎・藤原広行, 南西諸島における強震動シミュレーションのための 3 次元地下構造モデル, SSS23-08, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜 (横浜市), 2014 年 5 月 1 日.
- 中村武史, 竹中博士, 岡元太郎, 金田義行, 流体 - 固体境界周辺における 3 次元波動場の差分法に関する数値実験, *地震* 第 2 輯, 63 [3], 189-196, 2011.
- 岡元太郎, 竹中博士, 速度・応力型差分法での固体・流体境界の扱いについて, *地震* 第 2 輯, 57 [3], 355-364, 2005.
- Okamoto, T., H. Takenaka, T. Nakamura, and T. Aoki, Accelerating Large-Scale Simulation of Seismic Wave Propagation by Multi-GPUs and Three-Dimensional Domain Decomposition, *Earth, Planets and Space*, **62**, 939-942, 2010.
- Okamoto, T., H. Takenaka, T. Nakamura, and T. Aoki, Accelerating Large-Scale Simulation of Seismic Wave Propagation by Multi-GPUs and Three-Dimensional Domain Decomposition, in GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering, D.A. Yuen et al. (eds.), Chapter 24, 375-389, doi:10.1007/978-3-642-16405-7\_24, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- 岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之, 3 次元強震動・2.5 次元遠地理論波形により地震波波形データから推定される東北地方太平洋沖地震の破壊過程, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SSS30-03, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市), 2014 年 4 月 28 日.
- Takenaka, H., T. Nakamura, T. Okamoto, and Y. Kaneda, A unified approach implementing land and ocean-bottom topographies in the staggered-grid finite-difference method for seismic wave modeling, *Proceedings of the 9th SEGJ International Symposium*. Sapporo, Japan, 12-14 October 2009, pp: 1-4, doi: 10.1190/segj092009-001.13.
- Takenaka, H., Nakamura, T., Kuramoto, T., Okamoto, T., and Toyokuni, G., New FDTD Scheme for Unified Modeling of Nearfield Tsunami and Seismic Waves Using a Three-Dimensional Earth Model, APEC Cooperation for Earthquake Simulation (ACES) 8<sup>th</sup> International Workshop Advances in Simulation of Multihazards, 9426, Maui, Hawaii, 2012 年 10 月 23 日.
- 武尾実(1985): 非弾性効果を考慮した震源近傍での地震波合成, 気象研究所研究報告, **36**, 245-257.
- Talantola, A., Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation, *Geophysics*, **49**, 1259-1266, 1984.
- Tanimoto, T., Modelling curved surface wave paths: membrane surface wave synthetics, *Geophys. J. Int.*, **102**, 89-100, 1990.
- Tromp, J., Tape C., and Liu, Q., Seismic tomography, adjoint methods, time reversal and banana-doughnut kernels, *Geophys. J. Int.*, **160**, 195-216, 2005.
- Wu, C., Koketsu, K., and Miyake, H., Source process of the 1978 and 2005 Miyagi-Oki, Japan, earthquakes: Repeated rupture of asperities over successive large earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **113**, doi: 10.1029/2007JB005189, 2008.