

jh140017-NA10

GPGPU による地震ハザード評価

青井 真（国立研究開発法人 防災科学技術研究所）

概要 TSUBAME 上に実装した GPU 版の地震動シミュレータ GMS を用いた 2 つの研究を実施した。1 つ目は、これまでよりも短周期（周期 1 秒程度）までを対象とした地震ハザード評価であり、精緻な地下構造モデルと不均質性を考慮した多数の震源モデルを用いたこれまでよりも大規模な差分法シミュレーションを行い、これらのモデルが周期 1 ～ 2 秒程度の地震動評価に有効であることを示した。2 つ目は GMS のシミュレーション結果を用いた巨大海溝型地震の震源過程解析であり、曲面断層面モデルを構築し、3 次元地下構造モデルに基づいたグリーン関数を用いて 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源インバージョン解析を行い、3 次元地下構造モデルを考慮することで特に断層面浅部域の解析精度の向上に寄与できることを示した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京工業大学

(2) 共同研究分野

□ 超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

- 青井 真（防災科学技術研究所）：研究総括、地震動シミュレータの高度化
- 前田 宜浩（防災科学技術研究所）：地震ハザード評価
- 藤原 広行（防災科学技術研究所）：地震動シミュレータの高度化
- 岩城 麻子（防災科学技術研究所）：地震ハザード評価
- 鈴木 亘（防災科学技術研究所）：震源過程解析
- 松島 信一（京都大学）：地震ハザード評価
- 青木 尊之（東京工業大学）：地震動シミュレータの高度化

2. 研究の目的と意義

兵庫県南部地震を契機に、地震に関する調査研究の成果が国民や防災を担当する機関に十分に伝達され活用される体制になっていなかったという課題意識の下に、行政施策に直結すべき地震に関する調査研究の責任体制を明らかにし、これを政府として一元的に推進するため、地震防災対策特別措置法に基づき総理府に（現・文部科学省に）地震調査研究推進本部が設置されている。地震調査研究推進本部の地震調査委員会では、地震に関する観測、測量、調査

または研究を行う関係行政機関や大学等の調査結果を収集、整理、分析し、並びにこれに基づき総合的な評価を行っている。この中で地震動予測地図の高度化を進めており、日本周辺で発生する全ての大地震に関して、地震のリスク評価の基礎となり得る精度で地震ハザードを予測できるよう、手法・モデルの高度化を目指している。そのために、必要な精度、分解能を持つ地盤構造の開発を行うとともに、高精度かつ汎用性のある強震動シミュレーション手法の開発に関する研究を行っている。

強震動シミュレーションにおいて、詳細な 3 次元地下構造を十分な精度で離散化し高精度な計算を行い、短周期まで計算するためには細かな格子が必要であるため、実用的な計算においては格子数が数億から数百億に及ぶ極めて規模の大きなモデルを扱う必要がある。我々はこれまでに GPU で地震ハザード評価を行うシステムを構築し、従来は困難であった規模のシミュレーションを大量に行うことが可能となった。本共同研究では、GPU コンピューティングをスーパーコンピュータシステムに積極的に取り入れている東京工業大学の TSUBAME 上で大規模な地震ハザード評価を行うことで、主にリソースの制約から「決めうち」的に限られた想定震源（シナリオ）に対してのみ行われてきた従来のハザード評価の枠組みを超え、想定外を可能な限り生じさせないハザード評価のあり方を検討するとともに、南海トラフや相模トラフなどで想定される巨大海溝型地震を対象として実際にハザード評価を行うことを目的としている。そして今年度は次の 2 つの項目を目的とした研究を行う。1 つ目はこれまで検討を行ってきた超

高層建物や石油タンクなどに影響を及ぼす周期 3～20 秒程度の長周期地震動に比べて、より小規模な構造物に対して重要となるこれまでよりも短周期（周期 1 秒程度）までを対象とした地震ハザード評価である。2 つ目は地震ハザード評価において想定震源の設定に有効な知見となる過去に発生した地震の震源モデル（震源破壊過程）の高精度な推定のための GMS のシミュレーション結果を用いた巨大海溝型地震の震源過程解析である。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

地震の被害を軽減するためには、個々人の地震への防災意識を高め、地震に対する備えを促すことが不可欠である。このため、防災科学技術研究所（以下、防災科研と略す）では、日本全国で発生する地震を対象として、地震調査研究の成果の集大成である地震動予測地図を高度化し、地震ハザード・リスク評価に関する研究を行うとともに、WebGIS 等の技術を用いて、地震ハザード・リスク情報、地下構造データ等の関連情報を網羅的に提供可能な地震ハザード・リスク情報ステーションを構築している。我々がこれまでに東京工業大学の TSUBAME 上で構築してきた GPU による地震ハザード評価を行うシステムを最大限活用し、これらの環境を活用し、従来は極めて困難だった大規模モデルによるばらつきを含めた定量評価を行うことは、日本の防災力向上に大きく貢献することが期待される。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

我々はこれまでに、大地震発生の際のハザード評価に必要となる大規模な地震波伝播シミュレーションを高精度かつ効率的に実行するための 3 次元有限差分法に基づくアルゴリズムを開発すると共に、ソルバ及びプレ・ポスト処理ツールをパッケージ化し、地震動シミュレータ GMS として公開している（<http://www.gms.bosai.go.jp/GMS/>）。このツールは、研究・教育・実務等を目的とする多くのユーザーに利用されており、国の地震調査研究推進本部地震調査委員会が公表している全国地震動予測地図を作成するための主要ツールの一つとしても使用されている（http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/index.htm）。

言うまでもなく、高精度なハザード評価を行うためには地下構造や震源を精緻にモデル化し計算に取

り込まなくてはならないため、精細に離散化されたモデルに対する極めて大規模な計算を必要とする。我々は、平成 22～24 年度において、CPU 用に開発した地震動シミュレータ GMS を GPU に対応させ、TSUBAME 上でのチューニング及び性能評価・精度検証を行ってきた。その結果、数億から数百億格子程度の規模のモデルに対して十分な性能を発揮出来る環境の構築に成功した。これに伴い、1 基から千基以上の GPU を使用した弱スケーリングの評価において、ほぼ完全な線形性を達成した。さらに、シミュレーション結果に関しても、ポスト処理の一部をソルバに組み入れることで単一出力点当たりの出力サイズを圧縮すると共に、従来別途行っていたポスト処理の軽減化を実現したことで、一定量（数十万点程度）の出力であれば、実用的な時間内に出来るようになっている。平成 25 年度には、構築した環境を用いて南海トラフや相模トラフで想定される巨大海溝型地震の多数の地震動シミュレーションを行い、長周期地震動の予測結果のばらつき評価を行っている。また、研究成果の一部を地震調査研究推進本部へ資料提供している。

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1 地震ハザード評価の広帯域化

昨年度までの検討では、超高層建物や石油タンクなどに影響を及ぼす周期 3～20 秒程度を対象とした長周期地震動シミュレーションを行ってきたが、より小規模な構造物に対してはこれまでよりも短周期帯までを含んだ地震動評価が必要であり、そのためには、より精緻にモデル化された地下構造や震源を用いなくてはならない。本研究では、TSUBAME の GPU 環境を活用し、相模トラフで発生する巨大地震を対象として、数 100 億格子からなる地下構造モデルや、ランダム不均質性を考慮した数 100 ケースの震源モデルを用いた差分法シミュレーションを実施し、地震ハザード評価の広帯域化に向けた検討を行った。

5.1.1 詳細な 3 次元地下構造モデルを用いた地震動評価

防災科研が南関東地域を対象として現在作成中の浅部・深部統合地盤モデル [例えば、Senna et al. (2013)] を用いた地震動評価を行った。浅部・深部統合地盤モデルは、これまで別々にモデル化が行われてきた工学的基盤よりも浅い地盤モデル（浅

部地盤構造)と、それよりも深い地盤モデル(深部地盤構造)を統合し、両方の地盤構造の影響を受ける周期帯(周期 0.5 秒から 2 秒)における強震動予測精度の向上を目指すものであり、本研究の目的である地震ハザード評価の広帯域化に資するモデルといえる。

浅部・深部統合地盤モデルは、差分法シミュレーションに基づく長周期地震動評価では通常考慮されていない工学的地盤(V_s 波速度 V_s が 350m/s 程度以上)よりも浅部の低速度層がモデル化されているのが特徴である(図 1)。このモデルは図 1 に示した陸域について構築されており、海域を含む周辺地域に対しては、防災科研が整備している地震ハザードステーション J-SHIS (<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>)の深部地盤モデルと接合することで差分法シミュレーションのための地下構造モデルを作成した。地震動計算に用いた計算モデルの概要を表 1 に示す。 $V_s=350$ m/s 未満の層に対しては暫定的に $V_s=250$ m/s と仮定した。解析上限周波数は約 1.9Hz となる。図 2 に最大速度値、速度応答スペクトル(減衰 5%: 周期 1、2、3 秒)の分布を示す。計算結果に 1.5Hz のローパスフィルタを施している。比較のため、最表層を $V_s=500$ m/s としたケースの結果も併せて示している。図 1 に示した低速度層が厚くモデル化されている地域では、表層を $V_s=250$ m/s とした場合に $V_s=500$ m/s とした場合よりも振幅が増大しており、地点によっては最大振幅値が 2 倍程度増大していることがわかる。また、図には示さないが、両者のフ

ーリエスペクトルの差異は周期約 2 秒よりも短周期帯域において顕著であり、周期 1 秒程度まで解析対象周期帯を拡張するうえで、浅部地盤の影響を適切に計算に取り込むことの重要性が確認できた。

本モデルの格子数は約 390 億個であり、TSUBAME2.5 の S キューで 324GPU を利用した計算時間は約 3 時間である。この計算により約 60 秒間の波動場が計算されるが、長周期地震動ハザード評価のためには、より長時間の計算が必要となる。そのために、発散対策など差分法シミュレーションを安定して行うための地下構造モデルのチューニングも重要な課題だと考えられる。

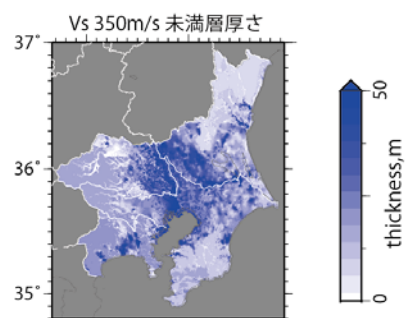


図 1 浅部・深部統合地盤モデルの最表層(S 波速度が 350m/s 未満)の層厚の分布。白～青で示した領域が浅部・深部統合地盤モデルの作成範囲。

表 1 地震動計算の概要

地下構造モデル		
格子数	第 1 領域	8799×6132×501
	第 2 領域	2933×2044×390
格子間隔	第 1 領域	30m（水平）、15m（鉛直）
	第 2 領域	90m（水平）、45m（鉛直）
震源モデル（2007 年 8 月 18 日 16:55、千葉県東方沖）		
震央位置	北緯 35.342°、東経 140.345°、深さ 20.2km	
地震モーメント	5.72×10 ¹⁶ Nm (Mw 5.1)	
メカニズム解	走向 236°、傾斜 20°、すべり角 76°	
震源時間関数	Smoothed ramp 関数(パルス幅 1 秒)	
計算条件		
時間間隔（秒）	0.001282	
タイムステップ数	50000	

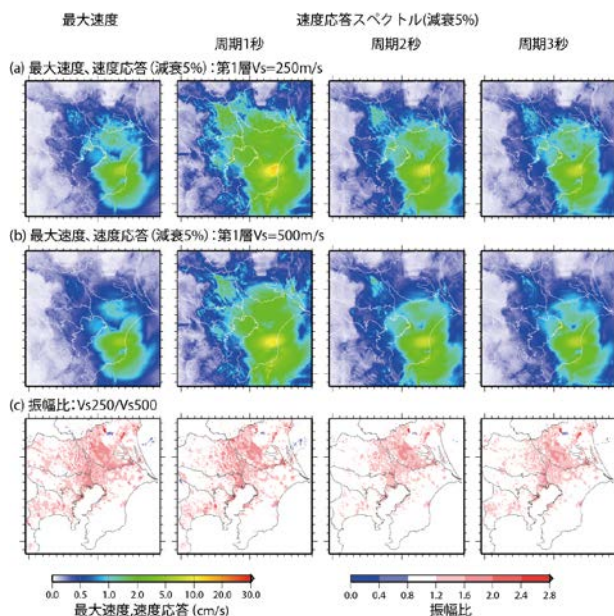


図 2 (a) 第 1 層を $V_s=250$ m/s とした場合と (b) $V_s=500$ m/s とした場合の、差分法シミュレーションによる最大地動速度と速度応答スペクトル(減衰 5%: 周期 1、2、3 秒)の空間分布、及び、(c) それらの振幅比。

5.1.2 不均質震源モデルを用いた地震動評価

強震動予測では、すべりが大きく地震波を強く励起する領域（アスペリティ）を矩形などに単純化して断層面上に配置した特性化震源モデルが用いられる。特性化震源モデルのように震源パラメータがアスペリティサイズ以下の不均質性を持たないモデルでは、アスペリティサイズと破壊伝播特性に規定される卓越周期よりも短周期帯域の地震動が適切に生成されず、特に巨大地震の場合には工学的に重要な周期帯域の地震動が過小評価される可能性がある（例えば関口・吉見、2006）。ここでは、周期 1 秒程度以上の長周期地震動評価において、震源パラメータにアスペリティサイズ以下の不均質性を付与する効果について検討した。

まず、不均質性を付与する土台となる震源モデル（均質モデルと呼ぶ）を設定した。ここでは、相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（地震調査委員会、2014）で示された相模トラフで想定される最大クラスの地震の震源域（図 5）をもとに 10 通りの震源域を設定し、アスペリティや震源域内で最初に破壊が始まる場所（破壊開始点）についても数通りを設定し、それらを組合せて 274 個の震源モデルを作成した。これらの均質モデルのすべり量分布と破壊伝播速度分布に対して、関口・吉見（2006）によるマルチスケール不均質を付与することで 274 個の不均質震源モデルを作成した。

地震波伝播シミュレーションに用いる地下構造モデルは、全国 1 次地下構造モデル（地震調査委員会、2012）から、東西 400 km、南北 400 km、深さ 100 km までの領域を切り出して、一辺 100m（深さ 8km 以上ではその 3 倍の大きさ）の格子サイズでモデル化した。格子数は約 19 億である。

地震波伝播シミュレーションでは、地下構造モデルを水平方向に 6×8 に分割したそれぞれの部分領域に 1 つの GPU を割り付けて計算処理を行っている。計算結果は、GMS の 1D Dump 機能を利用し、地動速度の 1 成分を 1 ファイルとして東西、南北、上下の 3 成分について出力している。1 ファイルには、陸域に約 2km 間隔で設定した約 1.5 万観測点の毎タイムステップ（全部で 50000 ステップ=250 秒）の地動速度値が記録されており、1 ファイルで約 12GB である。以上の計算では TSUBAME2.5 の S キュー（X キュー）を利用し、48GPU（16 ノード）を使用した実行時間は震源モデルの大きさに依存するが概ね 1.2~2 時間程度であり、TSUBAME2.5 を使用することで数百ケース

の計算を現実的な時間で実行することが可能となっている。さらに、出力された 1D Dump ファイルに対して、フィルタ、ダウンサンプリングのポスト処理を行い、各観測点の速度時刻歴を抽出し、最大地動速度（PGV）や速度応答スペクトルの空間分布を求める面的処理を行った。計算結果の例として、大正型関東地震に相当する震源域に対して、アスペリティ配置を固定し、4 通りの破壊開始点を設定した均質震源モデルと不均質震源モデルを用いて計算された PGV 分布を図 3 に示す。図 3 には均質モデルに対する不均質モデルの PGV 比の空間分布も示している。

震源モデルに対して付与した不均質性が、どの周期帯域に影響を及ぼしているかを見るために、東京都庁と神奈川県庁地点での相対速度応答値（周期 1、

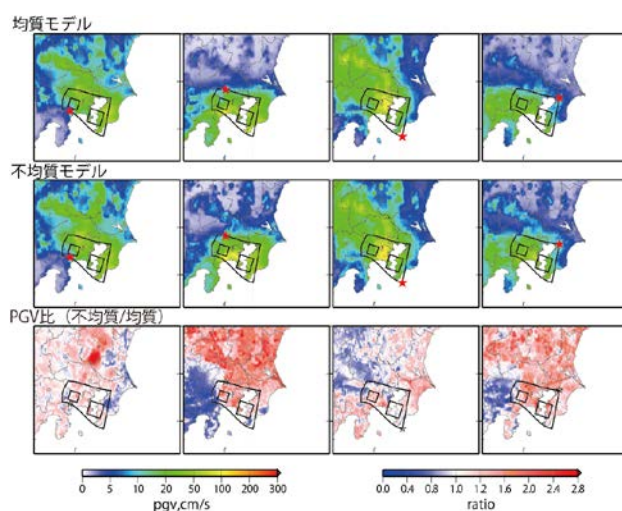


図 3 均質震源モデル(上段)と不均質震源モデル(中段)による PGV 分布と、それらの比(下段)。黒線は震源域とアスペリティ、星印は破壊開始点を示す。

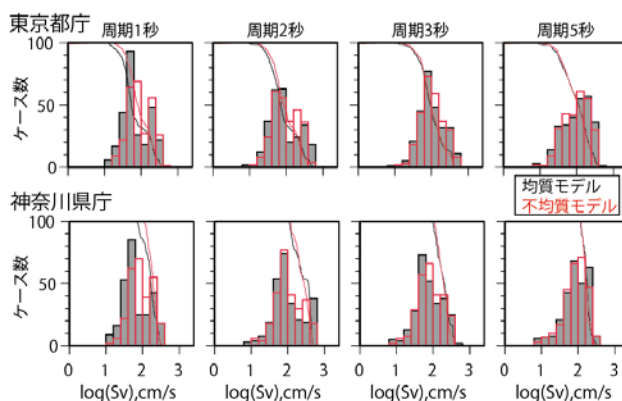


図 4 東京都庁、神奈川県庁地点での、均質震源モデル（灰）と不均質震源モデル（赤）による速度応答スペクトルの頻度分布。

2、3、5 秒；減衰 5%) の頻度分布（ヒストグラム）を図 4 に示す。均質モデル（灰色）と不均質モデル（赤線）に対するヒストグラムは、各周期において数 10～100 倍程度の大きなばらつきを有している。周期 5 秒では両者の分布にはそれほど大きな違いはみられないが、周期が短くなるにつれ不均質モデルの方が大きな振幅値をもつケースが多くなっている。

本研究で行った均質・不均質モデル（各 274 ケース）の計算結果を用いた長周期地震動の確率論的地震ハザード評価を行い、不均質性を考慮した効果を調べる。確率論的ハザード評価では地震の発生確率を設定する必要があるが、ここでは地震調査研究推進本部から公表されている確率論的地震動予測地図で仮定されている相模トラフの地震の発生パターンと各パターンの重み（発生頻度に対応する数値）を利用する。これにより、相模トラフの巨大地震が発生したという条件付きのハザードカーブを任意の地点に対して求めることができる。この作業を面的に行い、条件付き超過確率 50%での長周期地震動強さ（速度応答）を地図として示したのが図 5 である。周期 5 秒では均質モデルと不均質モデルから求めたハザードマップに明確な差異は認められないが、周期 1 秒では不均質モデルによる地図の方が全体的に大きな応答値を示している。このように、震源モデルの不均質性を考慮する効果は確認できたが、今後は、どの程度の不均質性を付与するのが適切であるかを確認するために、観測記録に基づいた検証が必要である。

5.2 3次元地下構造モデルを考慮した巨大海溝型地震の震源過程解析

適切な地震ハザード評価のためには、過去に発生した大地震、被害地震の震源破壊過程（震源モデル）の知見を踏まえて想定震源を設定することも重要である。震源破壊過程の推定（震源過程解析）では、まず地下構造モデルを仮定して断層面中の小領域（小断層）での単位モーメント解放による応答波形（グリーン関数）の計算を行う。震源破壊過程はグリーン関数を通じて実際の観測波形と結びつけられるので、逆解析（インバージョン解析）により推定することができる。既往のほとんどの震源過程解析では、大量のグリーン関数の計算が必要となることや、近年まで広い領域に及ぶ詳細な 3 次元不均質地下構造モデルが構築されていなかったことから、1 次元成層地下構造モデルに基づいたグリーン関数が

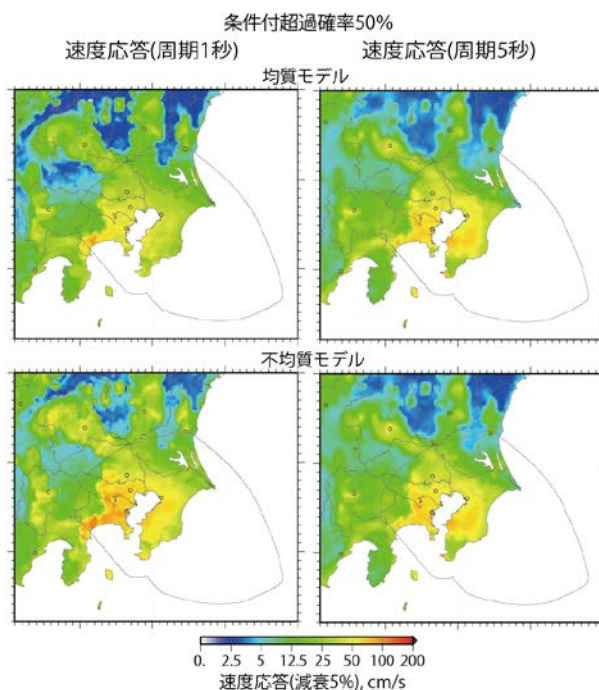


図 5 相模トラフの巨大地震に対する長周期地震動の条件付きハザードマップ。細線で示したのが最大クラスの地震の震源域。

用いられてきた。1 次元構造モデルに基づくグリーン関数は比較的短時間に計算可能であるが、現実には存在する様々な不均質性を水平方向に一樣としてモデル化しており、小規模な不均質構造の影響を受ける短周期の地震波ほど十分な信頼性での計算が困難となる。短周期の地震波は地下構造のみならず震源破壊過程の詳細な不均質性の情報をも有しており、3 次元不均質地下構造モデルを用いた震源過程解析は、詳細かつ信頼性の高い震源破壊過程を明らかにし、地震ハザード評価の高度化に資することが可能となる。地下構造モデルについては全国 1 次地下構造モデル（地震調査委員会、2012）等により日本全国に及ぶ 3 次元不均質構造モデルが構築されてきており、大規模なグリーン関数データセットの計算については TSUBAME の GPU 上での GMS を利用した差分計算により現実的な時間内で整備することが可能となった。本研究では 2011 年東北地方太平洋沖地震を対象として震源過程解析を試行する。東北地方太平洋沖地震のような巨大海溝型地震の地震波形には特に、プレート構造から堆積平野の構造まで様々な 3 次元不均質の影響が含まれていると考えられ、3 次元地下構造モデルを用いることは非常に重要である。

本検討では、3 次元地下構造モデルとして全国 1 次地下構造モデルを用い、南北 34° N～41.6° N、東

西 136° E~146.2° E、深さ 100 km までの領域について浅部域では水平方向 200 m、深さ方向 100 m の格子で、8 km 以深の領域ではその 3 倍の大きさの格子でモデル化した。総格子数は 21 億個となる。なお、震源が 8 km に近いときは 2 つの領域の接続による影響を避けるため、10 km までを細かい格子で計算することとした。この地下構造モデルの妥当性を確認するために、まず震源領域内で発生した規模のやや小さい地震の強震波形のシミュレーションを行った。対象とした地震は東北地方太平洋沖地震の破壊開始点の近傍で前日に発生した気象庁マグニチュード 6.8 の宮城県沖の地震で、震源メカニズムより東北地方太平洋沖地震と同様のプレート境界面で発生した地震と考えられる。計算は表 2 に示す諸元を用いて点震源を仮定して行った。図 6 に観測された強震波形と 3 次元地下構造モデルを仮定し GMS を用いて計算された波形及び 1 次元地下構造モデルを仮定し離散化波数積分法を用いて計算された波形の比較を示す。波形は速度波形で 0.01 Hz から 0.25 Hz のバンドパスフィルタをかけている。赤色の 3 次元地下構造モデルによる計算波形は、震央距離が比較的近い観測点 (MYG011) から遠い観測点 (IBRH19) まで、黒色の観測波形をよく再現している。特に 1 次元地下構造モデルでは計算の難しい後続波部分だけでなく、直達波部分や短い周期の変動の特徴もよく再現されており、3 次元地下構造モデルを用いることでグリーン関数を改善できる可能性を示すことができた。

東北地方太平洋沖地震の断層モデルは太平洋プレート境界上面に沿った曲面として設定し、震源過程解析における離散化として水平方向は等深度線に沿って 20 km ごとに、深さ方向には宮城県沖の破壊開始点を通る深さ断面で断層面に沿っておよそ 20 km ごととなるように 287 個の小断層へと分割した。そしてこの断層面モデルに対する 3 次元地下構造モデルを用いたグリーン関数の計算を行った。グリーン関数の震源時間関数として 6 秒幅の smoothed ramp 関数を採用し、地震モーメントを 1.0×10^{17} Nm として各小断層での純粋な左横ずれすべり及び逆断層すべりに対する波形を計算した。小断層 1 つの 1 方向のすべりに対して 0.0083 秒間隔 (120 Hz サンプリング) で 300 秒間の記録を得るための 36000 ステップの差分計算を実施し、計算時間は TSUBAME2.5 の S キューで 48 GPU を利用して約 1 時間となる。1 次元地下構造モデルを用いたグリーン関数と比較すると、特に浅い小断層について直達波部分に比べて後続波

表 2 計算に用いた地震の諸元

発震時	2011/3/10 6:23
震央位置	38.17216° N ; 143.04483° E
震源深さ	13.5 km
震源メカニズム	走向 213° ; 傾斜 23° ; すべり角 101°
地震モーメント	5.51×10^{18} Nm
震源時間	5 秒

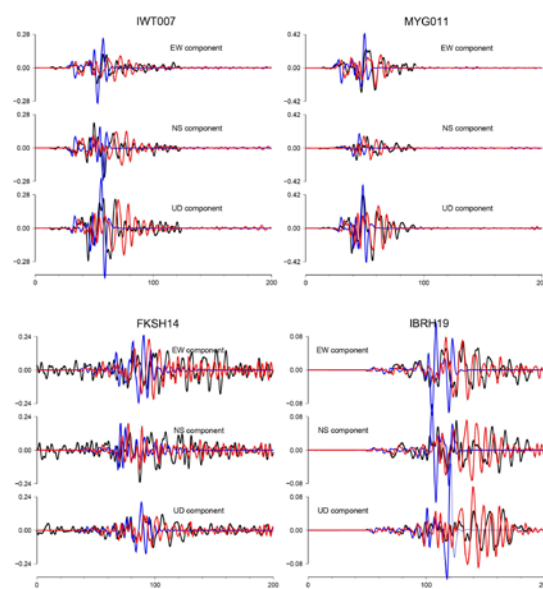


図 6 宮城県沖で発生した中規模の地震についての観測波形 (黒) と 3 次元地下構造モデルによる計算波形 (赤) 及び 1 次元地下構造モデルによる計算波形 (青) の比較。

部分の振幅が大きくまた継続時間も格段に長いことが確認された。また観測点に比較的近い深い小断層については、伝播距離が長くなるにつれ地下構造モデルの違いによる差異が大きくなるという特徴が見られた。

震源インバージョン解析には防災科研の強震観測網 K-NET8 点、KiK-net28 点 (図 7a) での 0.01-0.125 Hz のバンドパスフィルタをかけた 3 成分速度波形記録を用いた。波形合わせに用いた区間は P 波到達時からの 195~230 秒間 (観測点により異なる) である。解析手法としては各小断層での震源時間関数を複数の基底関数 (タイムウィンドウ) で分割して表現することで線型の逆問題とするマルチタイムウィンドウ線型波形インバージョン法を用いた。各小断層のタイムウィンドウとして、前段落で述べた 6 秒幅の smoothed ramp 関数を 3 秒毎 30 個並べることにより、最大 93 秒間のすべりを表現した。線形逆問題の

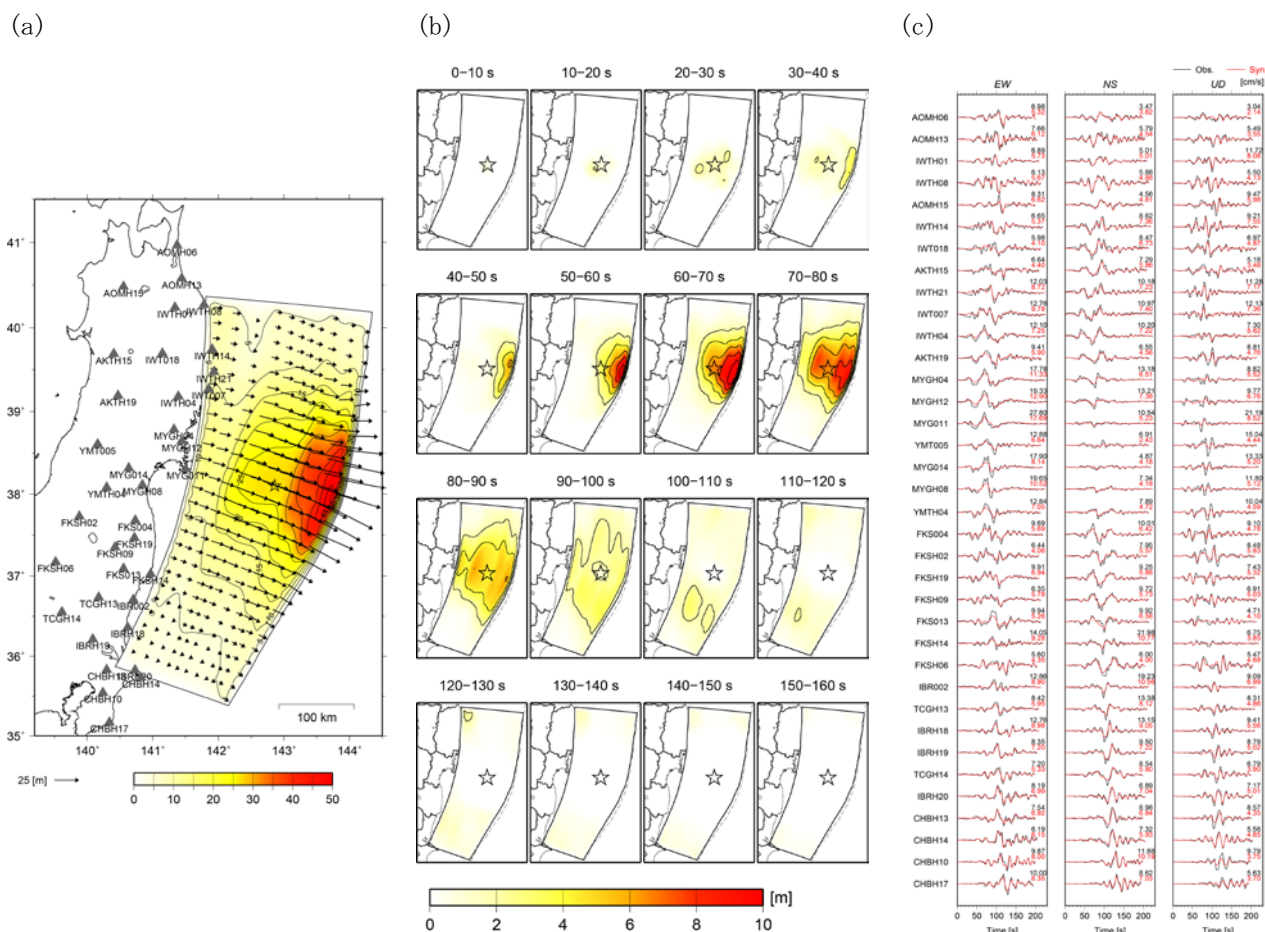


図 7 (a)3 次元グリーン関数を用いて推定された東北地方太平洋沖地震の最終すべり分布。解析に用いた強震観測点を合わせて示す。(b) 破壊進展のスナップショット。(c) 観測波形と合成波形の比較。

解を安定的に得るために、不等式拘束条件を用いた最小二乗法を用いて各小断層について推定されるすべり角に制限を与えた。また推定する各小断層・各タイムウィンドウでのモーメントレートについて、小断層毎の面積が異なることを考慮し、面積で除した量に時空間的な平滑化の条件を付加した。

図 7a に推定された最終すべり分布を示す。すべりの大きい領域は宮城県沖を中心に広がっており、特に海溝軸に近い浅い領域に近づくにつれてすべり量は大きくなり、最大すべり量は 48 m に達する。このような特徴は既往の 1 次元地下構造モデルを用いた解析結果 (Suzuki et al., 2011) と大局的には整合的である。グリーン関数以外の解析条件をすべて同じとした解析結果と比較すると、宮城県沖の最浅部のモーメント解放量は減少し、浅部の大すべり領域の南北方向の広がりが狭まると共に、宮城県沖の破壊開始点付近から断層面深部でのモーメント解放量が増加したという傾向が見られた。これらの特徴の違いは、浅い小断層についての地下構造モデルの違い

によるグリーン関数の変化に主に起因していると考えられる。

図 7b に 10 秒毎のすべり量分布で表した破壊進展のスナップショットを示す。破壊開始からの数十秒間は破壊開始点付近で小規模なすべりが生じ 30-40 秒後に破壊が最浅部に達した後、100 秒後まで浅い領域での破壊が続いた。その間、破壊は宮城県沖を深部に向かって進展し、50-60 秒後より再び破壊開始点付近で大きなすべりが生じ、さらに 70-80 秒後に断層最深部に破壊が到達した。90-100 秒後から破壊は南部へも進展し、150 秒後までにほぼ全体の破壊は終了した。図 7c に示す震源過程解析に使用した 36 観測点での観測波形と合成波形の比較より、推定された震源モデルにより観測波形の特徴がよく再現できたことが分かる。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

当初計画していた 2 つの研究を進めることができた。まず、これまでよりも短周期 (周期 1 秒程度)

までを対象とした地震ハザード評価については、5.1 に示したように、浅部・深部統合地盤モデル、および不均質性を付与した震源モデルを用いた差分法シミュレーションを行った。浅部・深部統合地盤モデルについては、本研究課題とは別に行われているモデル構築の進捗の関係で暫定版を用いた解析となったが、特に浅部地盤を考慮する効果と課題を確認することができた。また、震源モデルに関しても、多数のシミュレーション結果に基づいて断層破壊の不均質性を考慮する効果と課題を示すことができた。今後は、どの程度の不均質性を考慮すべきかを観測記録との比較から明らかにすることで、浅部・深部統合地盤モデルと不均質震源モデルを組み合わせた地震動シミュレーションに基づいた周期 1 秒程度までの長周期地震動のハザード評価を目指す。

GMS のシミュレーション結果を用いた巨大海溝型地震の震源過程解析については、5.2 に示したように中規模地震のシミュレーションにより 3 次元地下構造モデルの妥当性を確認した上で、287 個の小断層について逆断層すべりと横ずれ断層すべり 2 方向のすべりに対する総計 574 個のグリーン関数を TSUBAME の GPU 上での GMS を利用した差分計算により現実的な時間内で計算を実現した。これまでの震源過程解析で利用してきた 1 次元地下構造より現実的な、この 3 次元地下構造モデルから計算されたグリーン関数を用いて震源過程解析を実施し、地下構造モデルの違いの影響が大きく現れると考えられる断層面浅部域での特徴について興味深い知見が得られ、当初計画通り海溝型地震の震源過程解析の高度化を進めることができた。今後の展開として、詳細な 3 次元地下構造モデルの検討とその地下構造モデルを利用した解析を実施することにより、さらに詳細な震源の不均質破壊過程や中小構造物被害に関わるさらに短い周期の地震波に関わる震源モデル構築について研究を進展することが期待される。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

青井真・前田宜浩・青木尊之 (2014) GPGPU による地震ハザード評価, TSUBAME ESJ., 11, 13-17.

(2) 国際会議プロシーディングス

(3) 国際会議発表

Maeda, T., N. Morikawa, S. Aoi, and H. Fujiwara (2014) Finite-difference simulation of

long-period ground motion for the Nankai Trough earthquakes, 2014 Taiwan-Japan-New Zealand Seismic Hazard Assessment Meeting, in Taipei, Taiwan.

Maeda, T., N. Morikawa, S. Aoi, and H. Fujiwara (2014) Finite-difference simulation of long-period ground motion for the Nankai Trough megathrust earthquakes, 8-th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes, Sapporo.

Maeda, T., N. Morikawa, A. Iwaki, S. Aoi, and H. Fujiwara (2014) Simulation-Based Hazard Assessment for Long-Period Ground Motions of the Nankai Trough Megathrust Earthquake, Abstracts of 2014 Fall meeting of AGU, S31C-4438, in San Francisco, USA.

(4) 国内会議発表

前田宜浩・森川信之・青井真・藤原広行 (2014) 南海トラフの海溝型巨大地震を対象とした長周期地震動ハザード評価, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SSS23-13.

森川信之・前田宜浩・岩城麻子・今井隆太・青井真・藤原広行 (2014) 相模トラフの海溝型巨大地震を対象とした長周期地震動ハザード評価へ向けた検討, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SSS23-14.

青井真 (2014) GPU を用いた大規模シミュレーションによる地震ハザード評価, GPU テクノロジ・カンファレンス, 2014-7003.

前田宜浩・森川信之・岩城麻子・青井真・藤原広行 (2014) 震源モデルの不確実性を考慮した南海トラフの海溝型巨大地震の長周期地震動ハザード評価, 日本地震工学シンポジウム, OS1-Sat-PM1-6.

岩城麻子・森川信之・前田宜浩・今井隆太・青井真・藤原広行 (2014) 相模トラフの海溝型巨大地震の長周期地震動ハザード評価に向けた検討, 日本地震工学シンポジウム, OS1-Sat-PM1-7.

Aoi, S. (2015) Application of GPGPU to Seismic Hazard Assessment, Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure 2015.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

本プロジェクトで得られたシミュレーション結果の一部は、地震調査研究推進本部 (文部科学省) のもとに設置された強震動評価部会等の委員会に資料提供され、現在審議されており、長周期地震動予測などのハザード評価に活用される予定である。