

TSUBAME 共同利用 平成 27 年度 学術利用 成果報告書

GPGPU による長周期地震動シミュレーション  
Long-period ground motion simulation using GPGPU藤原広行  
Hiroyuki Fujiwara国立研究開発法人 防災科学技術研究所  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience  
URL: <http://www.bosai.go.jp/>

相模トラフ沿いの海溝型巨大地震を対象として、破壊開始点やアスペリティ配置などを変えて設定した 120 ケースの震源モデルと詳細な 3 次元地下構造モデルを用いた長周期地震動シミュレーションを、TSUBAME の GPU 環境に対応させた 3 次元差分法による地震動シミュレータ GMS を用いることで効率的に行った。これらのシミュレーション結果を用いることで、震源モデルや地下構造モデルが長周期地震動に及ぼす影響を評価することができ、さらに、事前の予測が困難な震源モデルの不確実さを考慮したばらつきを含んだ長周期地震動評価が可能となった。

We simulated long-period ground motion of the subduction-zone earthquakes along the Sagami Trough by the 3-D FDM of the Ground Motion Simulator (GMS) adapted to GPU on TSUBAME2.5. In the simulation, we used 120 cases of seismic source model which have different source parameters such like hypocenter and asperity and a detailed 3-D velocity structure model. These simulation results enable us to study the effects of source model and velocity structure model on long period ground motions. Furthermore it makes possible to assess the long-period ground motion considering uncertainties of source model.

*Keywords:* 長周期地震動、地震波伝播シミュレーション、GMS、GPU、相模トラフ

## 背景と目的

大地震の際に超高層ビルや石油タンクなどの長大構造物が長周期地震動による被害を受けることが知られている。2011年東北地方太平洋沖地震の際に、大阪平野内の超高層ビルが長周期地震動による被害を受けた事例は、震源から遠く離れた平野や盆地においても、複雑な地下構造の影響によって増幅された長周期地震動が、構造物に被害を及ぼし得ることを示している。3次元差分法などの数値シミュレーションにより複雑な地下構造が長周期地震動に及ぼす影響を評価することが可能だが、長周期地震動の予測のためには、地下構造の情報に加え、震源からの地震波の励起特性（震源モデル）に関する情報も必要となる。

巨大地震の震源モデルを事前に予測することが極めて困難なことは、2011年東北地方太平洋沖地震をみても明らかであり、長周期地震動の予測では、さまざまな可能性を考慮して多数の震源モデルを設

定し、各震源モデルに対する予測に加え、予測結果がどの程度のばらつきを持つかを定量的に評価することが重要となる。そのためには計算コストの高い大規模シミュレーションを多数行う必要がある。そこで、本課題では、TSUBAME2.5のGPU環境を利用して、多数回の大規模地震波伝播シミュレーションにもとづいた長周期地震動のハザード評価を行う。

## 概要

相模トラフ沿いのプレート境界ではマグニチュード8程度の海溝型巨大地震が想定されており、1703年元禄関東地震や1923年大正関東地震では、強震動や津波によって大きな被害が引き起こされたことが知られている。震源域直上に位置する関東平野内には多数の長大な構造物が存在しており、強震動や津波に加え、長周期地震動の予測も重要である。本研究では、大正関東地震型の海溝型巨大地震を模した多数の震源モデルを設定し、震源モデルの違いによ

って長周期地震動の予測結果がどの程度のばらつきを持つかについて、関東地域の 3 次元地下構造モデルを用いた 3 次元差分法による多数回の大規模地震波伝播シミュレーション結果をもとに評価する。

多数回の大規模シミュレーションを行うために TSUBAME の GPU 環境を利用する。防災科学技術研究所では、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 次元差分法に基づくソルバ及びプレ・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/>)。我々は、これまでに CPU 用に開発した GMS を GPU に対応させ、TSUBAME 上でのチューニング及び性能評価・精度検証を行い、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を構築しており、本研究ではそれを用いる。

強震動予測では、地震動を特に強く励起する領域（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。特性化震源モデルではアスペリティサイズよりも小さなスケールの不均質性を持たないため、特に巨大地震の場合に工学的に重要な短周期帯域の地震動が適切に生成されない可能性がある。そこで、本研究では、周期 2 秒以上を対象とした長周期地震動の計算を行うために、特性化震源モデルに短波長不均質性を付与した不均質震源モデルを用いることとした。大正関東地震型の海溝型地震を対象として、断層面、アスペリティの大きさと配置、破壊開始点位置を複数設定し、合計で 120 ケースの特性化震源モデルを作成し、さらに、これらの特性化震源モデルの破壊伝播速度、すべり量、すべり角の 3 つのパラメータに対してランダムな不均質性を付与した不均質震源モデルを作成した。

長周期地震動の計算に用いる地下構造モデルは、防災科学技術研究所によって関東地域を対象に構築された「浅部・深部統合地盤モデル」である。このモデルから、東西 320 km、南北 350 km、深さ 100 km までの領域を切り出して、水平方向 100m、深さ方向 50m（深さ 7.5km 以深ではその 3 倍の大きさ）の格子サイズでモデル化した。格子数は約 25 億である。

GPU 版の GMS を用いた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、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 1km 間隔で設定した約 5 万観測点の毎タイムステップ（全部で 98400 ステップ = 410 秒）の地動速度値が記録されており、1 ファイルで約 80GB 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概ね 3.5～4.5 時間程度であったが、5 時間を超えるケースも 1 割程度あった。

### 結果および考察

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するとともに、速度応答スペクトルを求めた。一例として、神奈川県庁地点における 120 ケースについての速度応答のヒストグラムを示す（図 1）。いずれの周期においても 10 倍程度の幅を持つ分布となっている。ヒストグラムの色は、破壊開始点の位置（図 2）に対応しており、橙色で示した観測点の真下から破壊が始まる 10 番のケースでは、他のケースにくらべ振幅が小さくなる傾向が認められる。長周期地震動の振幅は破壊の進行方向で大きくなる傾向があり、10 番のケースでは神奈川県庁地点に対しては破壊が遠ざかることとなるため、他の破壊開始点のケースに比べ振幅が低くなっていると考えられる。図 1 では破壊開始点のみに着目しているが、破壊開始点、アスペリティとの位置関係によっても各観測点の長周期地震動の振幅は変動し、その結果、震源モデルによって長周期地震動の空間分布も異なることとなる。

各ケースについて速度応答スペクトルの空間分布を求める面的処理を行い、120 ケースの結果を統計処理し、平均値、および平均値 + 標準偏差の空間分布を求めた（図 3）。平均値については、どの周期においても概ね 100cm/s 以下となっているが、平均値 + 標準偏差では短周期帯域で 150cm/s 以上となる地

点がみられる。また、長周期地震動の振幅が大きい領域は、関東平野などの平野・盆地部に対応しており、地下構造の影響を適切に評価することの重要性を示している。

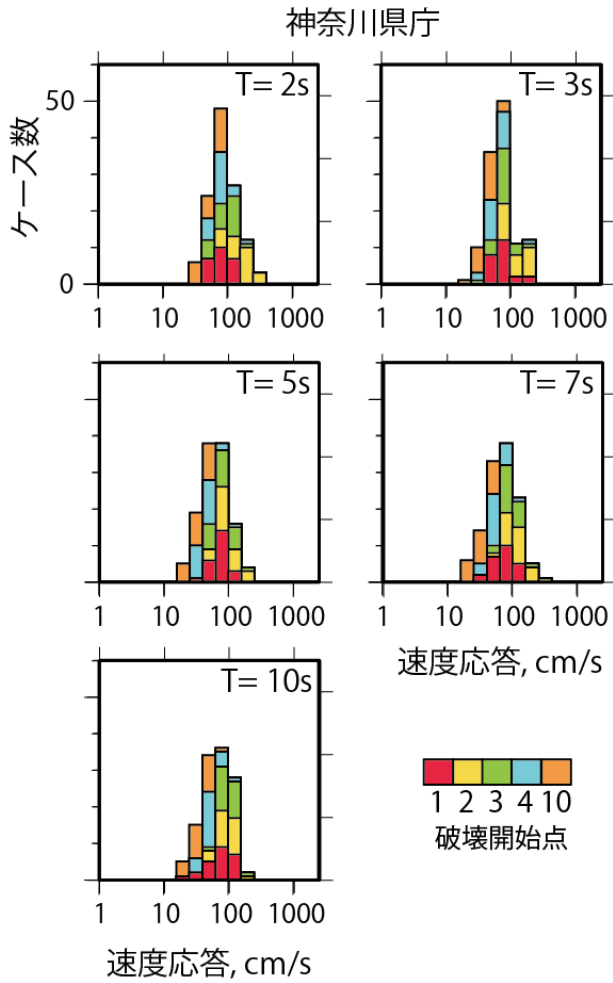


図 1 神奈川県庁位置での、周期 2、3、5、7、10 秒の速度応答値のヒストグラム (減衰 5%)。色は破壊開始点による (図 2)。速度応答値は、水平 2 成分のうち値の大きなものを用いている。

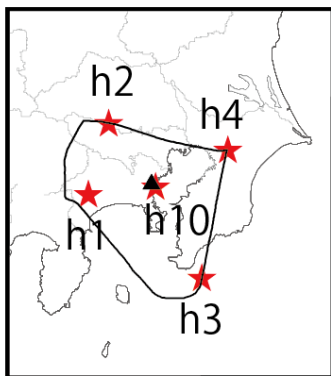


図 2 本研究で設定した震源域 (黒線) と破壊開始点 (赤星印)。黒三角は神奈川県庁の位置を示す。

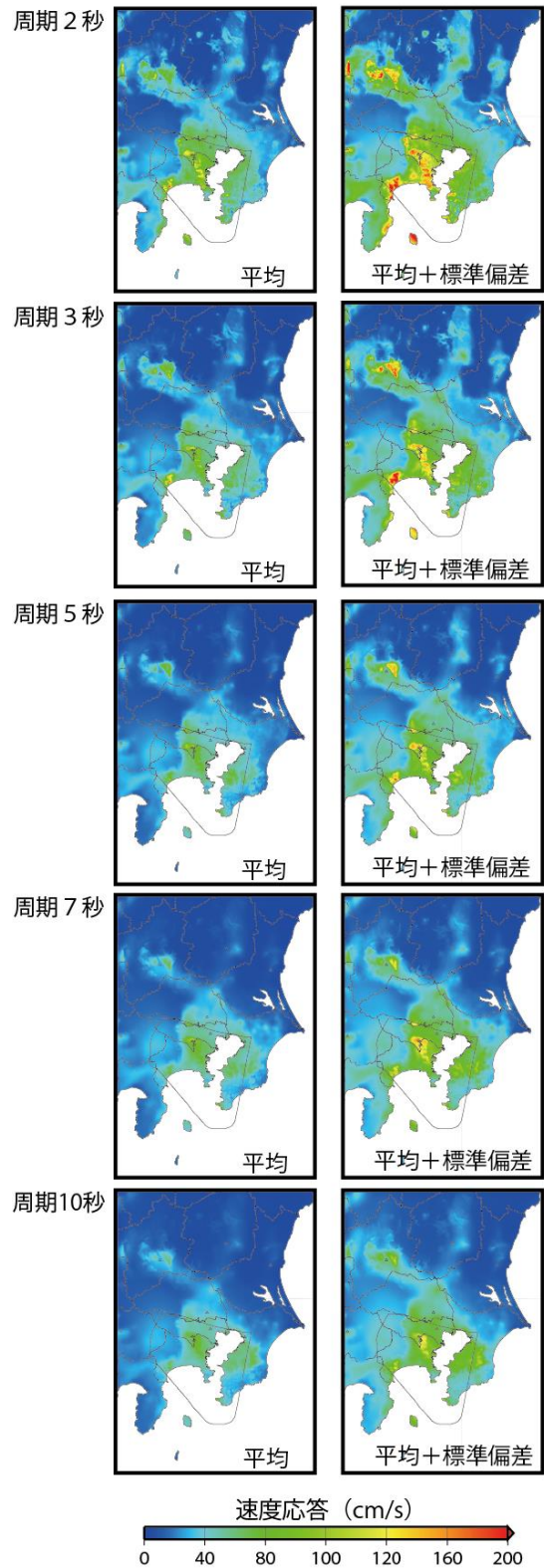


図 3 120 ケースの計算結果から求めた、速度応答値 (減衰 5%) の平均値と平均値+標準偏差の空間分布。

## まとめ、今後の課題

TSUBAME の GPU 環境を用いて、大正関東地震型の海溝型地震を対象とした 120 ケースの震源モデルに対する長周期地震動シミュレーションを行い、震源モデルの違いによるばらつきを含んだ長周期地震動評価を行った。

今後は、本研究で行った検討を他の地域で想定されている巨大地震に対して適用していくと同時に、本課題で設定した多数の震源モデルが長周期地震動のばらつきを評価する上で十分な母集団となっているかについて検討することが重要な課題である。また、シミュレーションによって得られる膨大な計算結果から、防災、減災に有用な情報を抽出し、効果的に可視化する手法を開発することも今後の重要な課題である。