

12-NA11

GPGPU による地震ハザード評価

青井 真（独立行政法人 防災科学技術研究所）

概要 昨年度までに、GPU 版の地震動シミュレータ GMS を TSUBAME2.0 上に実装し、単純なモデルによる弱スケーリングの性能評価で格子数が数百億規模の大規模モデルまで高いスケーラビリティを得ることができた。本年度は、実際の地震ハザード評価に活用できる大規模かつ現実的なモデルを用いて海溝型巨大地震の長周期地震動の試計算を行うとともに、大量の計算結果を伴うシミュレーションの出力削減アルゴリズムの実装を行った。

1. 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（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において、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、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おり、この中で地震動予測地図の高度化を進めている。日本周辺で発生する大地震に関して、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地震波伝播（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。

地震波伝播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、短周期の地震波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百億に及ぶ規模のモデルを扱うことになる。昨年度までのシステム開発により、地震動シミュレータ GMS を TSUBAME 上の GPU で現在想定されている数億～百億格子程度の規模のモデルに対して

実用上十分な性能を発揮出来る環境の構築に成功した。本年度は、二つの研究を計画している。1 つめは、TSUBAME 上に実装した GPU 版の地震動シミュレータ GMS により、実際の地震ハザード評価に活用できる大規模かつ現実的なモデルによる計算を行い海溝型巨大地震の長周期地震動の評価を行うことであり、2 つめは更なる出力手法の高度化である。

2011 年東北地方太平洋沖地震の例でも明らかのように、ハザード情報としての地震動シミュレーションは、従来のようにごく限られた想定震源に対してのみ行うのでは不十分である。これまでは、主にハードウェアリソースが不十分であったため、大規模なシミュレーションを伴う長周期地震動の評価は極めて限られた数の想定震源に絞らざるを得なかったが、我々はその状況を打破するためのブレークスルーの可能性の一つが GPGPU であると考え、大規模な GPU 環境が使用可能な TSUBAME をプラットフォームとし、相模トラフや南海トラフ等で想定される海溝型巨大地震に関する長周期地震動の評価を試行する。具体的には、数十～百ケースに及ぶ想定断層を設定し、各シナリオに対する予測だけでなく、ばらつきを定量的に評価することで、いわゆる「想定外」を可能な限り無くし、有用な防災情報とすることを目指す。

また、より多地点の出力を可能とするため、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する

ことを目指す

2. 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。

本研究では東京工業大学との超大規模数値計算応用分野での共同研究を行っており、これにより地震ハザード・リスク評価に用いられる地震波伝播シミュレーションに対する GPGPU の適用について、実務等に使用される汎用計算機環境から TSUBAME 2.0 のような大規模なスーパーコンピュータシステムまでの様々な規模の計算機環境における評価が可能となる。さらに、TSUBAME 上で構築してきた GPU による地震ハザード評価システムを最大限に活用することで、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が可能となり、日本の防災力向上に大きく貢献することが期待される。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

3.1 GMS による波動場の計算

本研究では、不連続な食い違い格子 (Aoi and Fujiwara, 1999) を用いた、空間四次・時間二次精度の差分演算子による実用コードである GMS (Ground Motion Simulator、青井・他、2004) をベースに GPGPU の適用性の評価を行なった。GMS は、防災科学技術研究所によってパッケージ化された、3次元有限差分法(FDM)により地震波伝播シミュレーションを行うためのツール群であり、主に Fortran90 で書かれた差分計算ソルバはソースコードも公開されている。

Aoi and Fujiwara (1999) や青井・他 (2004)

は、大きさの異なる格子を組み合わせることにより効率的かつ高精度に計算を行うことの出来る不連続格子による差分法の定式化を提案した。差分法による地震波伝播シミュレーションを行う場合、格子サイズは計算すべき最短波長により決定されるため、モデルのごく一部のみが低速度の媒質である場合でも計算領域全体を小さな格子に分割せざるを得ず、大規模なモデル計算の大きな障害となっていた。そこで、GMS では軟弱 (=地震波速度が低い) な表層が存在する浅い部分 (領域 I) の格子点間隔は細かく、深い部分 (領域 II) の格子点間隔は領域 I の 3 倍の粗い格子点間隔を有する格子モデルを用いている (図 1)。2つの領域はオーバーラップしており、波動場の連続性が保たれるよう内挿される。典型的な盆地構造モデルの計算において、均質な格子による場合と比較し数倍から十数倍程度効率がよいことが分かっている。

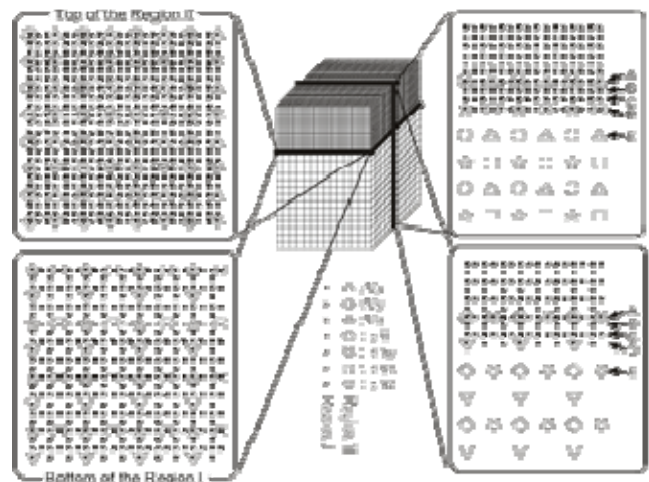


図 1 (中央) 計算に用いる不連続格子。(右) 不連続格子の垂直断面。領域 I と領域 II の接続部分で、内挿のために格子が重なっている。(左) 領域 II の最上面 (A 面) と領域 I の最下面 (D 面) における不連続格子の水平断面。

3.2 GPU での差分計算処理

GMS の差分法の計算処理部分については、ほぼ全て GPU 上で処理するように実装されている。開発環境には、NVIDIA 社から提供されている CUDA

(Compute Unified Device Architecture) を使用している。

昨年度までのプログラム開発により、GMS 差分計算ソルバの単体 GPU 版プログラムは、CPU 版プログラムに比べて 20.4 倍の性能となった。また、複数 GPU 版プログラムについては弱スケーリングに関しては、ほぼ線形の性能が得られ、約 220 億格子の 1024GPU による性能は 79.7TFLOPS になることが確認されている。

3.3 GMS の出力処理

GMS は計算結果の出力に、ネットワーク透過で自己記述的なバイナリファイルを入出力できる HDF5 ライブラリ (<http://www.hdfgroup.org/HDF5>) を利用している。GMS の差分計算ソルバは、用途に応じていろいろな出力条件を指定できるが、GPU 版プログラムでは最も自由度の高い 1D Dump 機能（任意の位置の計算結果を出力する機能）が実装されている。この出力機能では、毎タイムステップに指定した各観測点での波形を HDF5 でファイルに追記する。

モデル規模が大きくなると出力すべきデータも膨大になるが、一般的に出力の並列性能を高めることは困難である。また、GPU での計算処理が極めて高速であるため、相対的にファイル出力に要する時間の割合が高くなってしまう。

昨年度の研究では、GPU による計算結果を CPU に転送後、メモリを利用して出力のバッファリングを行うことにより、出力時間を低減する実装を行った。ディスク I/O が比較的低速な PC ではバッファリングステップ数を 100 とした場合で出力時間を約 1/3.5 に削減されるなど出力時間の低減効果が認められたものの、ファイルシステムが極めて高スループットである TSUBAME2.0 では、バッファリング処理に係るオーバーヘッドが比較的高コストとなり、出力時間の低減効果は認められなかった。

そこで本年度の研究では、地震ハザード評価の実務にとって計算全体のターンアラウンドタイム（turnaround time）の短縮が、最も必要とされて

いる条件の一つであるという問題意識の下、GPU プログラムに逐次フィルタを伴うデシメーション処理を組み込むことにより、根本的な出力容量の削減を試みることにした。これにより差分計算だけでなく後段のフィルタ処理、可視化処理等のポスト処理の I/O 量も削減することができ、全工程のターンアラウンドタイムを短縮することが可能となると考えられる。

3.4 デシメーションフィルタによる出力の高速化

差分法では計算安定条件を満たすために、ハザード評価として必要な周波数よりも数十倍高い周波数での計算が行われている。従来は、全ての計算結果をファイルに出力していたが、エイリアシングを避けて必要な周波数帯域のみを抽出する逐次デシメーション処理を行うことにより、ファイル出力量を大幅に削減できる可能性がある（図 2）。

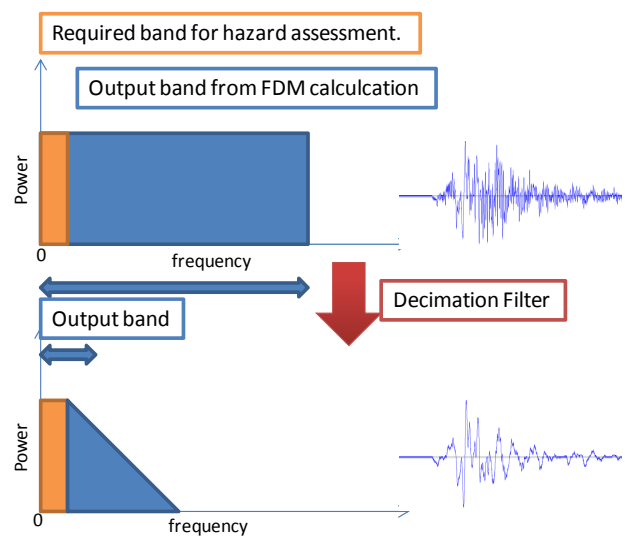


図 2 差分の安定計算に必要な周波数帯域（青色）と、地震ハザードの評価に必要な帯域（オレンジ色）の違い。デシメーションフィルタを適用することで右側のようにエイリアシングを避けて波形を間引くことが可能となる。

本研究においては、高周波数成分を遮断するために IIR (Infinite Impulse Response) フィルタを利用する。IIR フィルタを適用するには、波形出力点ごとに過去の入力、出力をメモリ上のバッ

ファに蓄える必要があるが(図 3)、実際のハザード評価では波形出力点は地表面に適切な間隔で設定され、出力点数は格子数と比較して 1/10000 以下と十分小さいため、IIR フィルタバッファは GPU 上のメモリで対応可能である。今回は IIR フィルタとして 2~8 次のバターワース型フィルタを用いた。

GPU でデシメーション処理した波形を CPU に転送し、さらに MPI(Message-Passing Interface)でディスク出力するホストに転送する。ここでも出力のバッファリングを行うことにより、ディスク I/O の理論値に近い速度でファイルに書き出すことが可能となる。

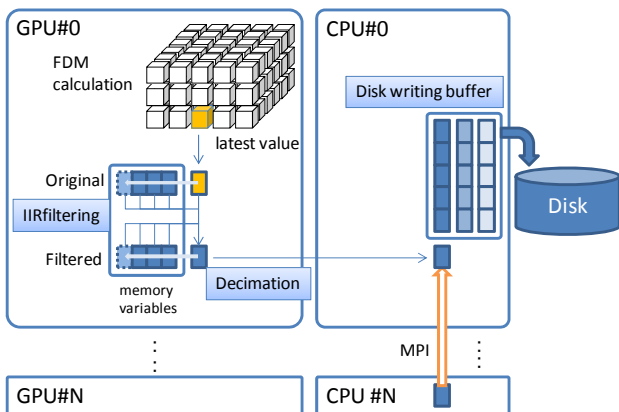


図 3 差分の計算からディスク出力までのデータフローの概念図。必要な格子上の出力に IIR フィルタを適用し、時間ステップで間引いて CPU に転送する。その後 MPI で CPU#0 に集約し、バッファリングしてディスクに書きだす。

3.5 出力性能の評価

デシメーションフィルタを用いた出力性能を検証するために、21,560,000 格子のモデル(Unit420 と呼ぶ)上に 64 万点の波形出力点を設定し、TSUBAME2.0 の 1GPU で 1000step の計算を実行して所要時間を測定した。

IIR フィルタの次数を 0 (フィルタなし)、2、4、6、8 次とし、出力間隔を 1 (間引きなし) ~5 まで変化させて測定した結果を図 4 に示す。D2H(GPU でのデシメーション処理及び CPU への転送) はフィルタの次数が大きくなるに従って増加しているが、H2H (CPU 間の MPI 通信) と H2F (ファイル書

き出し) は、出力間隔を大きくすることで減少する傾向がみられ、8 次のフィルタを用いて出力を 1/5 に間引いた場合では、出力時間 (D2H, H2H, H2F の和) は約 2/5 に低減されている。

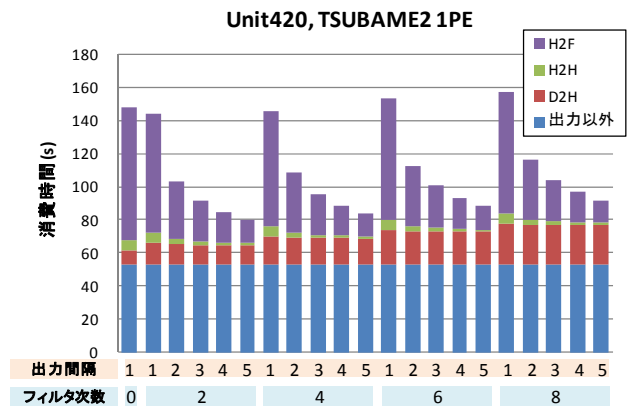


図 4 格子数約 2200 万の問題 (Unit420) を 1 プロセスで実行した場合のデシメーションフィルタの効果。D2H は GPU でのデシメーションフィルタ処理及び CPU への転送、H2H は CPU 間の MPI 通信、H2F はファイル書き出し処理の時間。100 ステップの出力バッファを介してファイルに書き出している。

実際の地震ハザード評価で対象とするモデルは規模が大きいため、マルチプロセス・ノードの利用が必要となる。また、2000 万格子程度のモデルに対して 64 万点もの波形出力点を設定することは現実的ではない。そこで、より現実的な問題における出力の高速化の効果を確認するため、Unit420 を水平方向に 8×8 に並べて格子数を 64 倍としたモデル(Unit3360 と呼ぶ)を 64 プロセスで実行し性能の再検討を行った。なお、出力点数、step 数は Unit420 を用いた検討と同条件とした。

結果を図 5 に示す。1 プロセスが受け持つ波形出力点数が Unit420 の 1/64 であるため、フィルタ処理の所要時間 (D2H) が減少しているが、MPI によるホスト間転送の所要時間 (H2H) はやや増大している。8 次のフィルタを用いて 1/5 に出力を間引いた場合の出力時間は約 1/6 に削減されている。

本手法により、ファイルへの書き出し量が減少するだけでなく、CPU 間の通信量も減少し、ホスト間転送時間が削減されることから、大規模計算

への適合性も高いことがわかった。本手法は I/O 全体の所要時間の削減に非常に有効であるといえる。

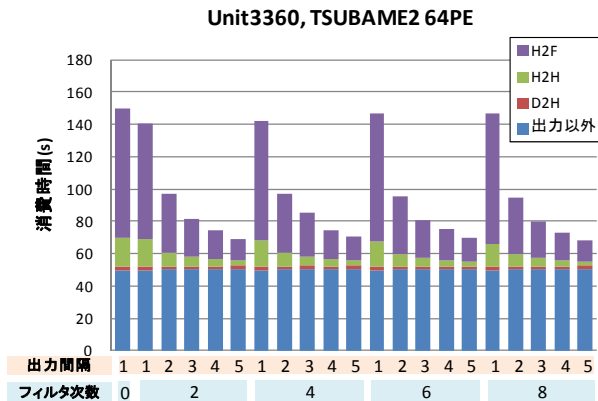


図 5 Unit420 の 64 倍の規模の問題 (Unit3360) を 64 プロセスで実行した場合のデシメーションフィルタの効果。

3.6 海溝型巨大地震の長周期地震動の評価

相模トラフで発生すると考えられる海溝型巨大地震を対象とした長周期地震動の試計算を行った。地震波伝播シミュレーションに用いる地下構造モデルと震源モデルは、次のように設定した。まず、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 440 km、深さ 80 km までの領域を切り出して、表 1 に示す格子サイズでモデル化した。また、震源モデルは 1923 年関東地震 (大正型) を想定して設定し、震源 (破壊開始点) で始まった断層運動が、地震波を強く励起する領域 (アスペリティ) を破壊しながら同心円状に広がる様子を、約 3 万個の点震源によってモデル化し、差分格子上に配置した。

今回の計算では、このモデルを水平方向に 9×9 の部分領域に分割して、それぞれ 1 つの GPU を割り付けて計算処理を行った。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た。1 ファイルには、陸域に約 2.5 km 間隔で設定した約 2 万観測点の毎タイムステップの地動速度値が記録されており、1 ファイルで約 14GB である。以上の計算では TSUBAME2.0 の S キュー (X キュー) を利用しており、81GPU (27 ノード) を使用した実行時間は約 25 分であった。なお、同じ震

源モデル、地下構造モデルに対して、防災科学技術研究所で使用している計算機 (Altix4700) で 252core (Intel Itanium 1.66GHz) を用いた場合の実行時間は約 7.3 時間となっており、TSUBAME2.0 を使用することで 100 ケースを超える多数の計算を現実的な時間で実行できる環境が得られたといえる。

表 1 計算の概要

格子サイズ	第 1 領域	2200×1951×81
	第 2 領域	734×651×241
格子間隔 (m)	第 1 領域	200 (水平)、100 (鉛直)
	第 2 領域	600 (水平)、300 (鉛直)
時間間隔 (秒)		0.008
タイムステップ数		45000
出力ファイルサイズ		14GB×3 成分

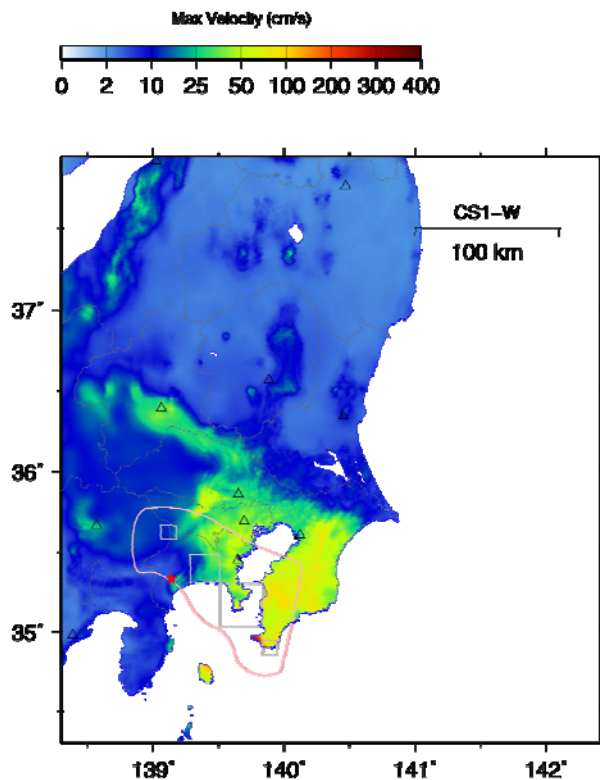


図 6 関東地震 (大正型) を想定した地震波伝播シミュレーションによる、最大地動速度値の空間分布。赤線で囲んだ領域は震源断層面、震源断層面内の灰線で囲んだ領域はアスペリティ、赤星は破壊開始点を示している。

出力された 1D Dump ファイルに対しては、ポスト処理として、フィルタ処理、ダウンサンプリン

グ処理を行い、各観測点の速度時刻歴を抽出するだけでなく、最大地動速度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ている。面的処理の例として最大地動速度値の空間分布を図 6 に示す。

今回の計算で用いたモデルに対して、3.4 で検討したデシメーション処理を適用すると、8 次のフィルタを用いて 1/5 に出力を間引いた場合の出力時間は約 16 分となり、ポスト処理の軽減化とともに計算時間の短縮にも有効であることが確認できた。

4. 今後の展望

GMS の出力手法の高度化に関しては、GPU 内部でデシメーションフィルタを用いたポスト処理を行い、ソルバ内部・外部の I/O を削減するアプローチがターンアラウンドタイムの短縮に非常に有効であることが確認できた。今後は、地震ハザード評価のポスト処理で行われている繰り返し作業全体に対しても高速化を試みていく。

実際の地震ハザード評価への活用に関しては、海溝型巨大地震を対象とした大規模かつ現実的なモデルに対して地震波伝播シミュレーションを実施できる環境が構築されたことから、今後は、数百ケースの想定震源（シナリオ）に対する予測結果のばらつきの定量的な評価を行うことで、海溝型巨大地震を対象とした長周期地震動のハザード評価を目指す。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文（投稿中のものは「投稿中」と明記）

(2) 国際会議プロシーディングス

S. Aoi, N. Nishizawa, T. Aoki (2012) Large Scale Simulation of Seismic Wave Propagation using GPGPU, 15th World Conference on Earthquake Engineering, in Lisbon, 4620.

A. Iwaki, S. Aoi (2012) Estimation of Three-Dimensional Basin Boundary Shape Using a Random Search Method, 15th World Conference

on Earthquake Engineering, in Lisbon, 1694.
T. Maeda, N. Morikawa, S. Aoi, H. Fujiwara (2012) FD Simulation for Long-Period Ground Motions of Great Nankai Trough, Japan, Earthquakes, 15th World Conference on Earthquake Engineering, in Lisbon, 5422.

(3) 国際会議発表

上記(2)で示した 3 件を、2012 年 9 月 24-28 日に Lisbon にて開催された、第 15 回世界地震工学会議にて発表した。また、下記 2 件を 2012 年 12 月 3-7 日に San Francisco にて開催された、アメリカ地球物理学連合秋季大会にて発表した。

S. Aoi, T. Maeda, N. Nishizawa, T. Aoki (2012) Large-scale ground motion simulation using GPGPU, American Geophysical Union 2012 Fall Meeting, in San Francisco, S53G-06.

T. Maeda, W. Suzuki, S. Aoi, H. Fujiwara (2012) Long-period ground motion simulation of the 2011 Tohoku-oki earthquake, American Geophysical Union 2012 Fall Meeting, in San Francisco, S33A-2510.

(4) 国内会議発表

前田宜浩・森川信之・岩城麻子・青井真・藤原広行 (2012) 南海トラフの最大級地震による長周期地震動, 日本地震学会秋季大会, P3-67.

(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。