

10-NA12

## GPGPU の地震ハザード予測シミュレーションへの適応性評価

青井 真 (独立行政法人 防災科学技術研究所)

**概要** 地震ハザードを予測するには高精度かつ大規模な波動伝播シミュレーションを行う必要があり、実用的な計算においては格子数が数億から数十億に及ぶ極めて規模の大きなモデルとなることが多い。このように大きな計算機リソース (CPU パワー及びメモリ) を必要とする地震ハザード予測シミュレーションへの GPGPU (General Purpose Computation on Graphics Processing Unit) の適用性を評価した。

### 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に設置 (現・文部科学省に設置された) 機関として、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ったり、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数十億に及ぶ極めて規模の大きなモデルを扱う必要がある。近年の計算機環境の劇的な進歩の恩恵を受けたとはいえ、大きな計算機リソース (CPU パワー及びメモリ) を必要

とし、実務等で一般的に使用可能な計算機では数日以上計算となる事もしばしばである。このような状況を打開する手段として、多くの数値計算分野で広く使われるようになりつつある GPGPU (General Purpose Computation on Graphics Processing Unit) の利用が考えられる。

本研究では、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 TSUBAME 上で強震動予測計算を試行し、高度な地震ハザード評価への適応性を評価することを目的とする。

### 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強震動シミュレーションに対する GPGPU に適用について、実務等に使用される汎用計算機環境から TSUBAME 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。

### 3. 研究成果の詳細

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(図1: 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)により地震波伝搬シミュレーションを行うためのツール群となっており、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している。

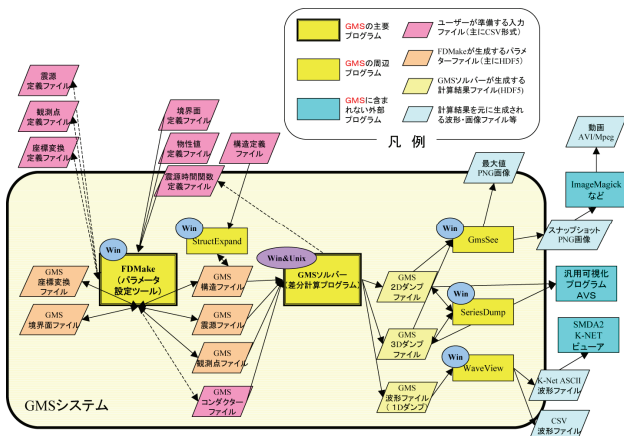


図1 GMS (Ground Motion Simulator) の構成

差分法により地震波伝播シミュレーションを行う場合、均質な大きさの格子を用いる限り、格子サイズは計算すべき最低波長により決定される。低速度の媒質がモデルのごく一部にのみ存在する構造を扱う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を行う際には大きな障害となる。実地震の再現計算や地震ハザード評価を行う際には、堆積平野構造を有するモデルなど地表に近いほど極端に地震波速度が遅い構造を取り扱うことが多いため、上記のような問題を回避するためには地震波速度構造に合わせた不均質な格子を用いることが有効である。

Aoi and Fujiwara (1998) 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。図2に示すように、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。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良いことが分かっている。

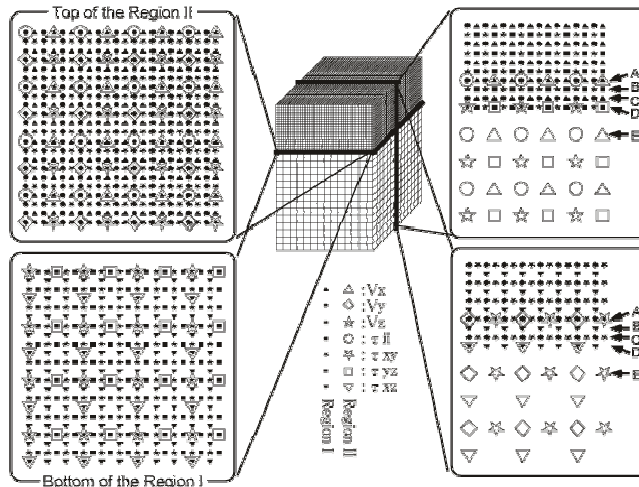


図2 (中央) 計算に用いる不連続格子。(右) 不連続格子の垂直断面。領域Iと領域IIの接続部分で、内挿のために格子が重なっている。(左) 領域IIの最上面(A面)と領域Iの最下面(D面)における不連続格子の水平断面。

GMS に対する GPU 実行機能の追加においては、開発環境に NVIDIA 社から提供されている CUDA (Compute Unified Device Architecture) を使用し、差分法の計算処理部分についてはほぼ全てGPUで処理するように実装を行っている。GPU においては演算速度が極めて高速であるため、差分法のように大量のメモリアクセスを伴う手法においてはメモリ転送速度がボトルネックになることが多い。そのため、GPU の高い演算性能を引き出すためには効率的なメモリアクセスを行うことが重要となる。

本実装では、ブロックを2次元で構成し、計算

の対象となる x-y 平面にブロックを敷き詰めるように配置している。そのため、生成されるスレッドの数は x-y 方向の格子数に対応することになる。ブロック内の各スレッドは z 方向の始点から終点まで 1 格子点ずつ計算処理を進め、3 次元領域全体の計算処理を行う (図 3)。差分法の計算処理では計算の対象となる格子のデータの他に隣り合う格子のデータが必要となるが、各スレッドが隣り合う格子のデータをグローバルメモリから読み込んだ場合、スレッド間では重複して同じデータが読み込まれることになる。グローバルメモリへのアクセスはレジスタやシェアードメモリと比べレイテンシが高く低速であるため、このような重複したデータの読み込みは性能低下の要因となる。そこで、各スレッドが担当する格子のデータをブロック内で共有される高速なシェアードメモリに読み込み、隣接する格子のデータを参照する際にはシェアードメモリに読み込んだデータを利用することによりグローバルメモリへのアクセスを軽減している。

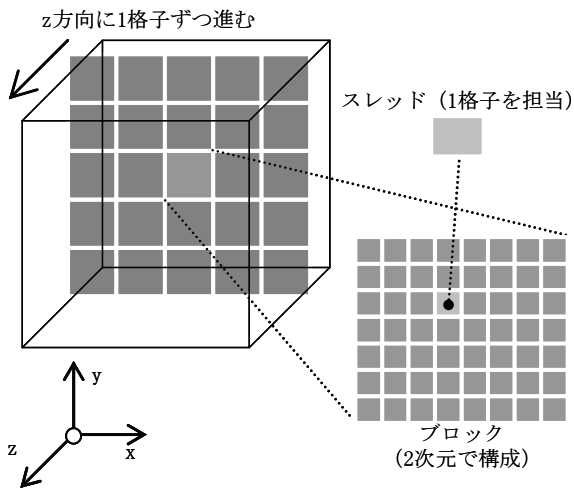


図 3 GPU での計算処理

GPU 版プログラム、および比較用として CPU 版プログラムの性能試験を行った。GPU 版プログラムの実行には GPU に NVIDIA Tesla S1070、開発環境には NVIDIA CUDA 2.3 を用いた。CPU 版プログラムの実行には CPU に Intel Itanium2 1.66GHz (SGI Altix4700) を 1 コア、コンパイラには Intel Fortran Compiler 10.1 を用いた。データは不連

続格子により構成されたモデルを使用し、計算規模は細かい格子の領域 (領域 I) が 1020x720x38、粗い格子の領域 (領域 II) が 340x240x105 で合計約 3650 万格子となる。ステップ数は 100 とし、時間計測においてはファイル入出力等を除いた差分法の計算処理部分のみを対象とした。また、浮動小数点の演算精度は、GPU 版プログラム、CPU 版プログラム共に単精度で行っている。

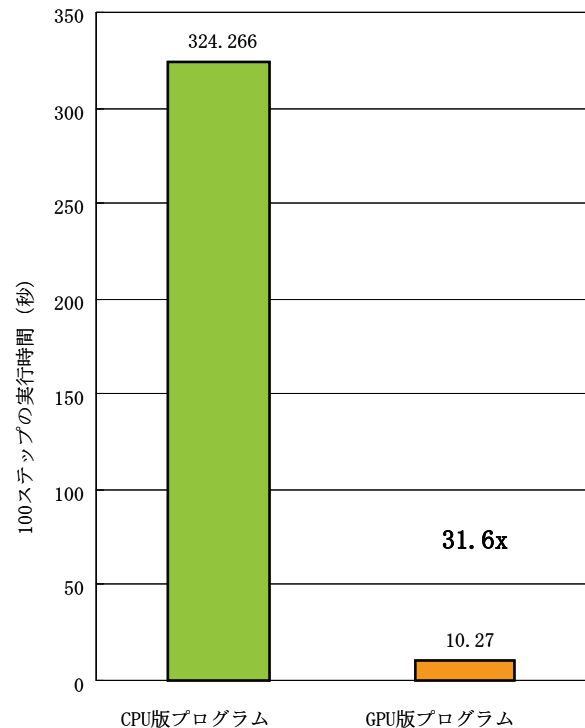


図 4 GPU 版プログラムの性能

性能試験の結果から、CPU 版プログラムに比べて GPU 版のプログラムは約 31.6 倍の性能が得られていることが確認された (図 4)。これは、CPU で 1 ヶ月かかる計算がわずか 1 日で終了することになり、相当な高速化が図られたことになる。また、NVIDIA CUDA に付属する性能解析ツールを用いて GPU とグローバルメモリ間のメモリ転送速度を計測したところ、最大で 74GB/s になることが確認された。NVIDIA Tesla C1060 のメモリバンド幅は 102GB/s であるため対理論性能に換算すると 73% となり、律速の要因はメモリ転送速度であるので、このようなメモリ転送速度が十分に高い部分では更なる高速化の余地は少ないと考えられる。

#### 4. これまでの進捗状況と今後の展望

本研究ではこれまで、地震ハザード評価に必要なとなる3次元差分法による波動伝播シミュレーションの標準的なツールとして用いられているGMSをGPGPUに対応させ、その有効性を検証してきた。単一GPUにおいては、CPU版に比べ、31.6倍の高速化が図られ、GPUの導入が極めて有効であることが示された。他分野の計算コードにおいて、CPUを用いた計算速度に対するGPUのパフォーマンスがより高い値を示す場合もあるが、差分法による波動伝播シミュレーションの律速要因はメモリ転送であることから、更なる高速化の余地はそれほど大きくはない。

単体のGPUが有するグローバルメモリはハイエンドのもので1~6GB程度であるため、大規模な計算を行うためには、複数GPUによる並列計算が不可欠となる。そのため、今後は複数GPUによる並列計算に対応し、地震動の再現やハザード評価に実際に用いられている数億~数十億格子規模のモデルに対して、その有効性の検証を行なっていく予定である。

#### 研究成果リスト

- (1) 学術論文  
青井真・西沢直樹・青木尊之, 2010, GPUを用いたGMSによる強震動シミュレーション, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, 1915-1920.
- (2) 国際会議プロシーディングス
- (3) 国際会議発表
- (4) 国内会議発表  
青井真・西沢直樹・青木尊之, 2009, GPGPUを用いた三次元波動伝播シミュレーション, 2009年日本地震学会秋季大会  
青井真・西沢直樹・青木尊之, 2010, 強震動シミュレータGMSのGPU化, 第122回物理探査学会学術講演会  
青井真・藤井公輔・青木尊之, 2010, マルチGPUによる三次元波動伝播シミュレーション, 日本地球惑星科学連合2010年大会
- (5) その他(特許, プレス発表, 著書等)