12-NA11

青井　真（独立行政法人　防災科学技術研究所）

GPGPUによる地震ハザード評価

1. はじめに

我々はこれまでに、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てきた。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であり、差分計算ソルバはソースコードも公開されている。従来、大規模なシミュレーションを伴う長周期地震動を評価する際、主にハードウェアーリソースが不十分であるために、極めて限られたシナリオ（想定断層）に対する予測しか出来なかった。いわゆる「想定外」を可能な限り減らすため、多数の想定断層を設定しばらつきを定量的に評価することを目標に、大規模なGPU環境が使用可能なプラットフォームであるTSUBAMEを活用し相模トラフの地震に関する長周期地震動の評価を試行する。

2. 差分法による地震波動伝播シミュレーション

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。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。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。

3. GPUでの差分計算処理、および複数GPUによる並列化

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、差分法の計算処理についてはほぼ全てGPUで処理する形になっている。

複数のGPU を用いた並列計算を行う際は、モデルを水平方向に分割し、各GPU に分割した部分領域を割り付けて差分演算を行う。各分割領域の接続面では、隣接する領域の格子点のデータが必要となるため、袖領域（重複領域）を設け、必要に応じてデータを交換する。

複数GPUを用いた並列計算では、通信処理がボトルネックになることが多いため、計算処理と同時に通信処理を行う「隠蔽」が重要となる。通常は、通信の対象となる袖領域の計算を事前に行い、内部領域を計算している間に並行して通信を行う手法がとられることが多いが、GPU が苦手とする不連続なメモリアクセスが生じるために効率が上がりにくい。本研究では、GMS が採用している不連続格子が2つの異なる格子サイズを持つ領域（領域I、領域II）からなることに注目し、一方の領域を計算する間に他方の領域の通信を行うことで袖領域のみの計算を別途行う必要性を回避した。

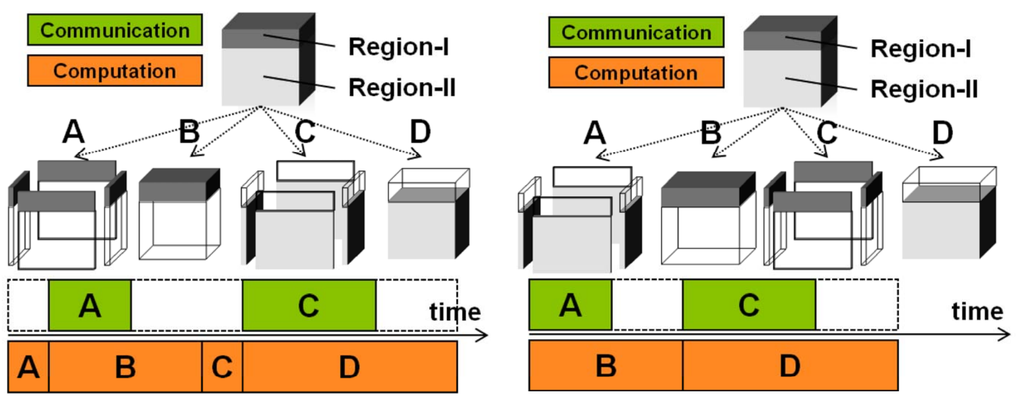

図1
（左）複数GPUでの並列計算 (水平方向の領域分割に並列化)
（右）本研究で開発した通信時間の隠蔽方法 (袖領域の事前計算が必要ない)

4. TSUBAME 2.0での性能評価

複数GPUを用いた並列性能の評価を実施した。計算モデルには、Unit420を単位モデルとし、これを水平方向に2x2、3x3、4x4、8x8、10x10、16x16、32x32個並べて、全体の格子数がそれぞれ4倍、9倍、16倍、64倍、100倍、256倍、1024倍となるようなモデルを使用した。

複数GPUでの性能試験の結果の結果から弱スケーリングに関しては、ほぼ線形（実際には線形を超える）の性能が得られた。

GPU版プログラムでは、Unit6720（約55億格子）の256GPUによる性能が21.1TFLOPS、Unit13440（約220億格子）の1024GPUによる性能が79.7TFLOPSになることが確認された。CPU版プログラムではUnit13440の1024並列での性能が2.3TFLOPSであることから、約34倍の性能が得られていることが分かった。

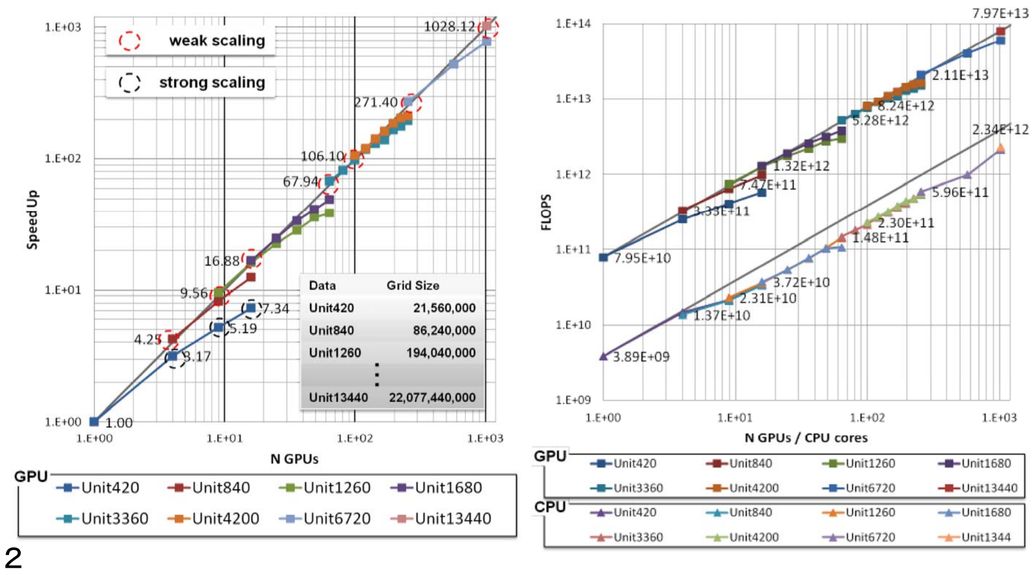

図2
（左）並列数と高速化率の関係。　（右）並列数とFLOPSの関係

5. ファイル出力機能の追加と高速化

GMSの差分計算ソルバは、地震波動場の時間進展をタイムステップ毎に大量にファイル出力する。GPU の演算速度は極めて高速であるため、各タイムステップのOpen/Close処理などオーバーヘッド処理が差分計算ソルバ全体のボトルネックとなることが予想されたことから、CPUの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い評価した。PC環境のように出力環境が比較的低速な場合にはバッファリング等の工夫により出力が高速化される（左）。しかし、TSUBAMEではファイルシステムが極めて高スループットで、かつOpen/Close処理が高速であるため、バッファリング処理は効果的ではないことがわかった（右）。

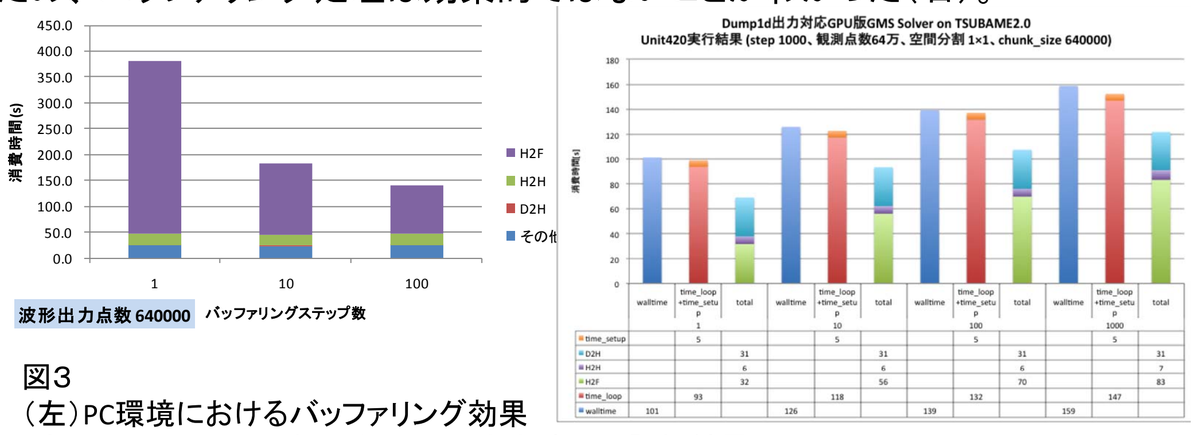

図3
（左）PC環境におけるバッファリング効果
（右）TSUBAME 2.0 におけるファイル出力時間の評価結果

6. 今後の展望

2011年東北地方太平洋沖地震の例でも明らかなように、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、主にハードウェアー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絞らざるを得なかった。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、相模トラフの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。

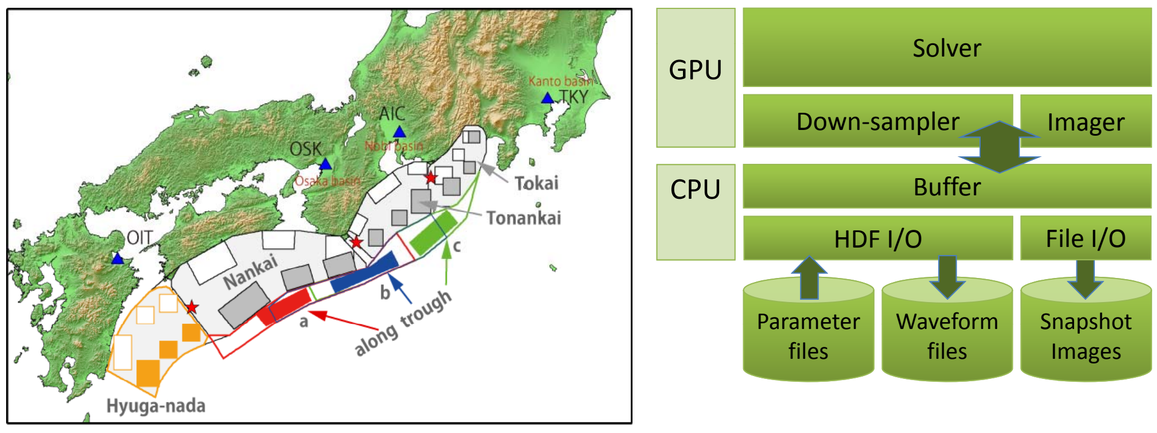

図4
（左）南海トラフにおける想定断層の設定例（海鼠状の形が断層領域、内部の長方形は「アスペリティ」と呼ばれ地震波を多く放出する領域。各領域が単独で破壊する（単独型）だけでなく、複数の領域が同時に破壊する（連動型）など、様々なパターンの震源モデルを考慮することで、地震動のばらつきを定量的に評価することが可能となる。
（右）エイリアシングを避けるためには十分な遮断性能の高次のフィルタをソルバーに組み込みデシメンション処理を行うことで、大量の出力を伴う面的評価に必要な高速なファイルI/Oを実現する。また、計算と波動場の面的な可視化同時に行うことで効率的なシミュレーションを目指す。