



1. はじめに

防災科学技術研究所では、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、必要な精度・分解能を持つ地盤構造モデル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。従来、大規模なシミュレーションを伴う長周期地震動の評価では、主にハードウェアリソースが不十分であるために、極めて限られた想定断層(シナリオ)に対する予測しかできなかったが、本研究では、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東京工業大学のTSUBAME2.0を活用し、海溝型巨大地震に関する長周期地震動のハザード評価を試行する。

2. 差分法による地震波伝播シミュレーション

Aoi and Fujiwara (1999)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(図1)を用いることで、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向上することが分かっている。防災科学技術研究所では、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としてGMS(Ground Motion Simulator、青井・他、2004)を開発し、不連続格子を用いた空間四次・時間二次精度の差分演算子による差分計算ソルバはソースコードも公開されている。

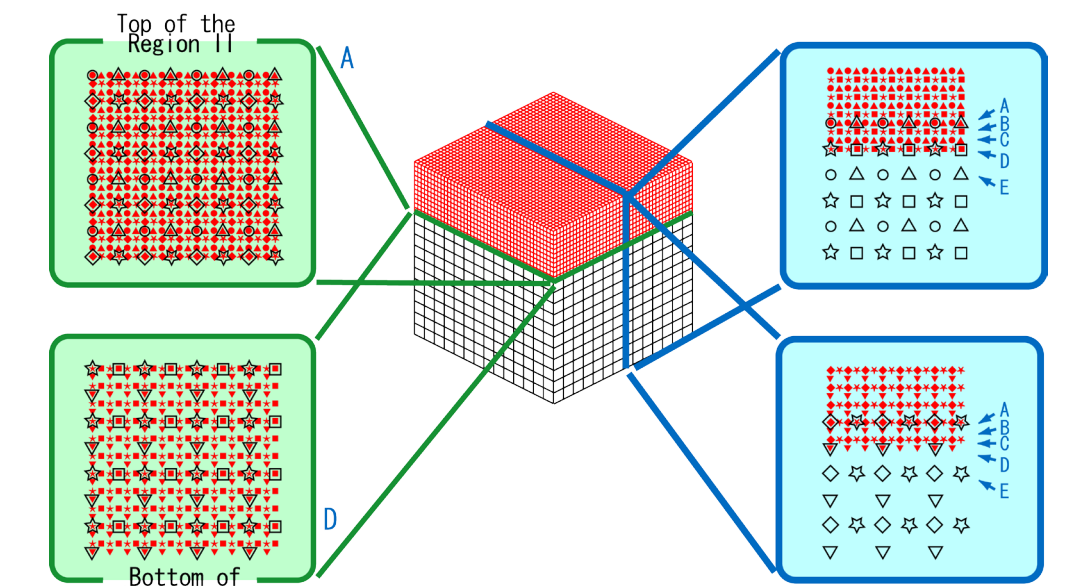


図1 (中央)計算に用いる不連続格子。(右)不連続格子の垂直断面。領域Iと領域IIの接続部分で、内挿のために格子が重なっている。(左)領域IIの最上面(A面)と領域Iの最下面(D面)における不連続格子の水平断面。

3. GPUでの差分計算処理、および複数GPUによる並列化

我々はこれまでに、GMSをベースにGPGPUの適用性の評価を行ってきた。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、モデルを水平二方向に分割し、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)を設けて必要に応じてデータを交換する。この際、GMSでは不連続格子が2つの異なる格子サイズを持つ領域(領域I、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っている(図2)。これ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イリングに関しては、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(図3)。

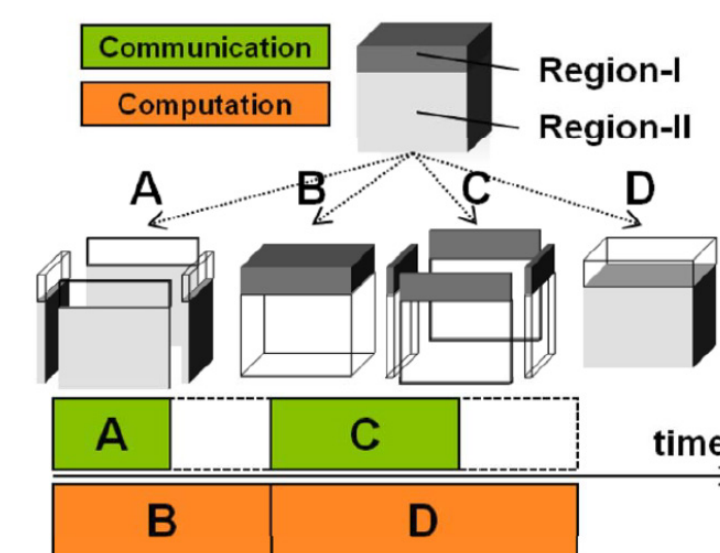


図2 通信時間の隠蔽方法

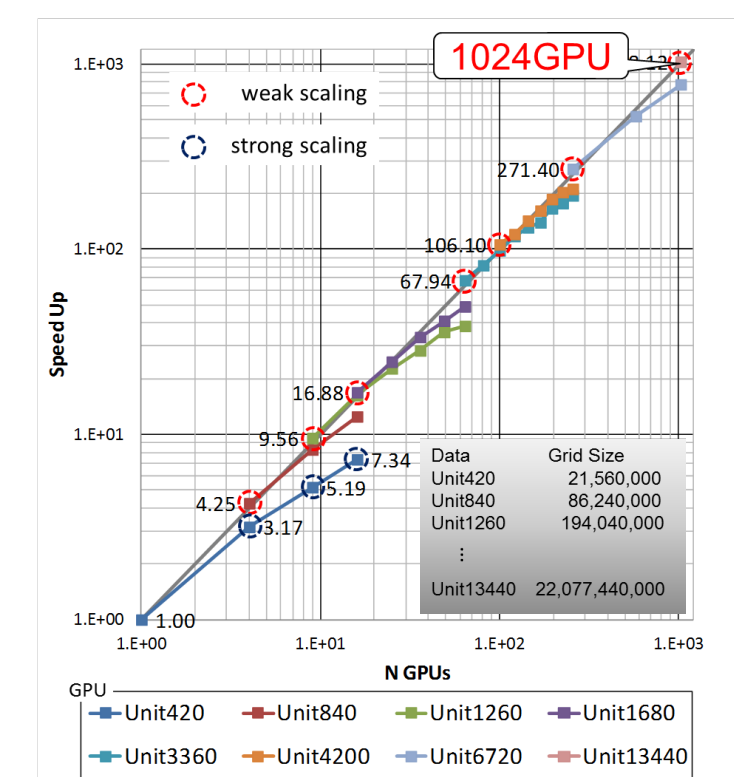


図3 並列数と高速化率の関係

4. 出力の高速化

モデル規模が大きくなると出力すべきデータも膨大となる。また、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(図4)。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実装することにより、ファイル出力量、およびCPU間通信量が低減し、ターンアラウンドタイムの短縮が図られている(図5)。

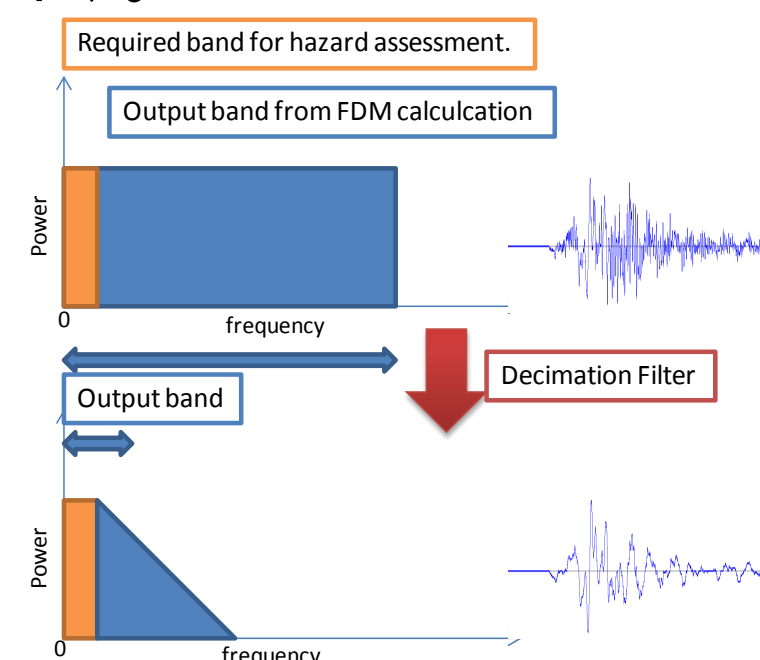


図4 差分の安定計算に必要な周波数帯域(青色)と、地震ハザードの評価に必要な帯域(オレンジ色)の違い。デシメーションフィルタを適用することでエイリアシングを避けて波形を間引くことが可能となる。

5. 今後の展望

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波伝播シミュレーションは極めて限られたシナリオに対してのみ行うのでは不十分であり、ある地点に対して影響を及ぼす全ての地震を考慮して、その地点が大きな地震動に見舞われる危険度をハザードカーブとして評価する、いわゆる「地震ハザード評価」と組み合わせる行うことが重要である。これまでの研究開発により、TSUBAME2.0上にて南海トラフや相模トラフで想定される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を用いた地震波伝播(長周期地震動)シミュレーションを実施する環境が構築されている(図6)。今後は、地震調査研究推進本部(文部科学省)で行われている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に資するため、地震の発生に関連する不確実性を考慮して設定した数百ケースのシナリオに対するシミュレーションを行い、予測結果のばらつきを定量的に評価することで、いわゆる「想定外」を可能な限り減らし、有用な防災情報とすることを旨とする(図7)。

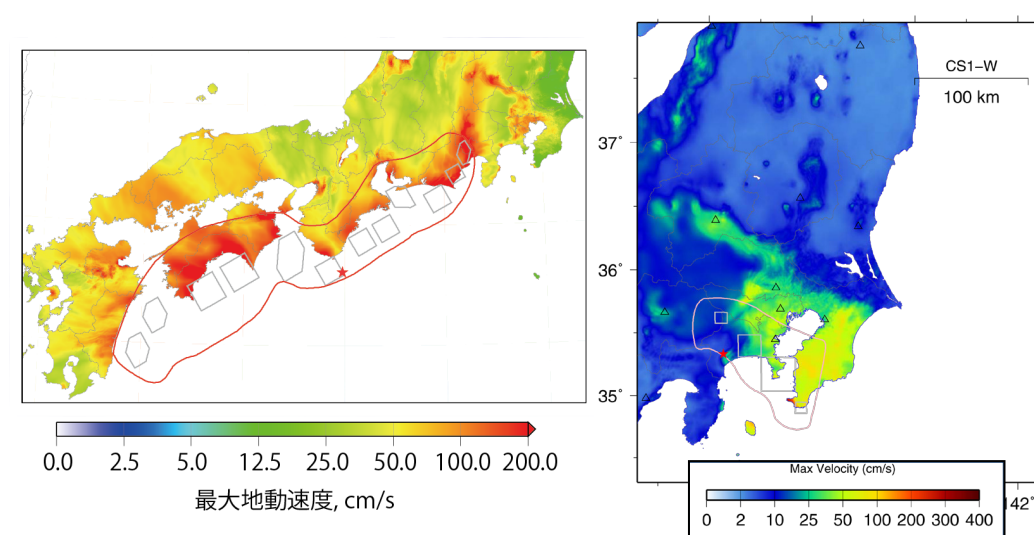


図6 南海トラフの巨大地震(左)と大正型関東地震(右)を想定した長周期地震動シミュレーションによる最大地動速度値の空間分布。赤線で囲んだ領域は震源断層面、震源断層面内の灰線で囲んだ四角形は地震波を強く放出する「アスペリティ」と呼ばれる領域、赤星は破壊開始点を示している。

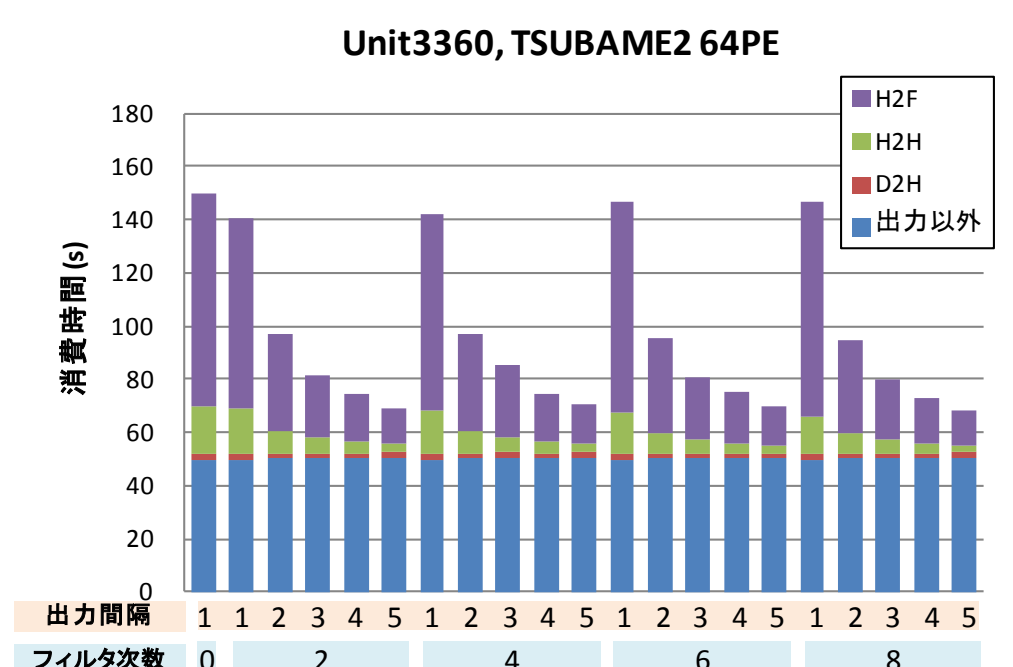


図5 格子数約13.8億の問題(Unit3360)を64プロセスで実行した場合のデシメーションフィルタの効果。D2HはGPUでのデシメーション処理及びCPUへの転送、H2HはCPU間のMPI通信、H2Fはファイル書き出し処理の時間。

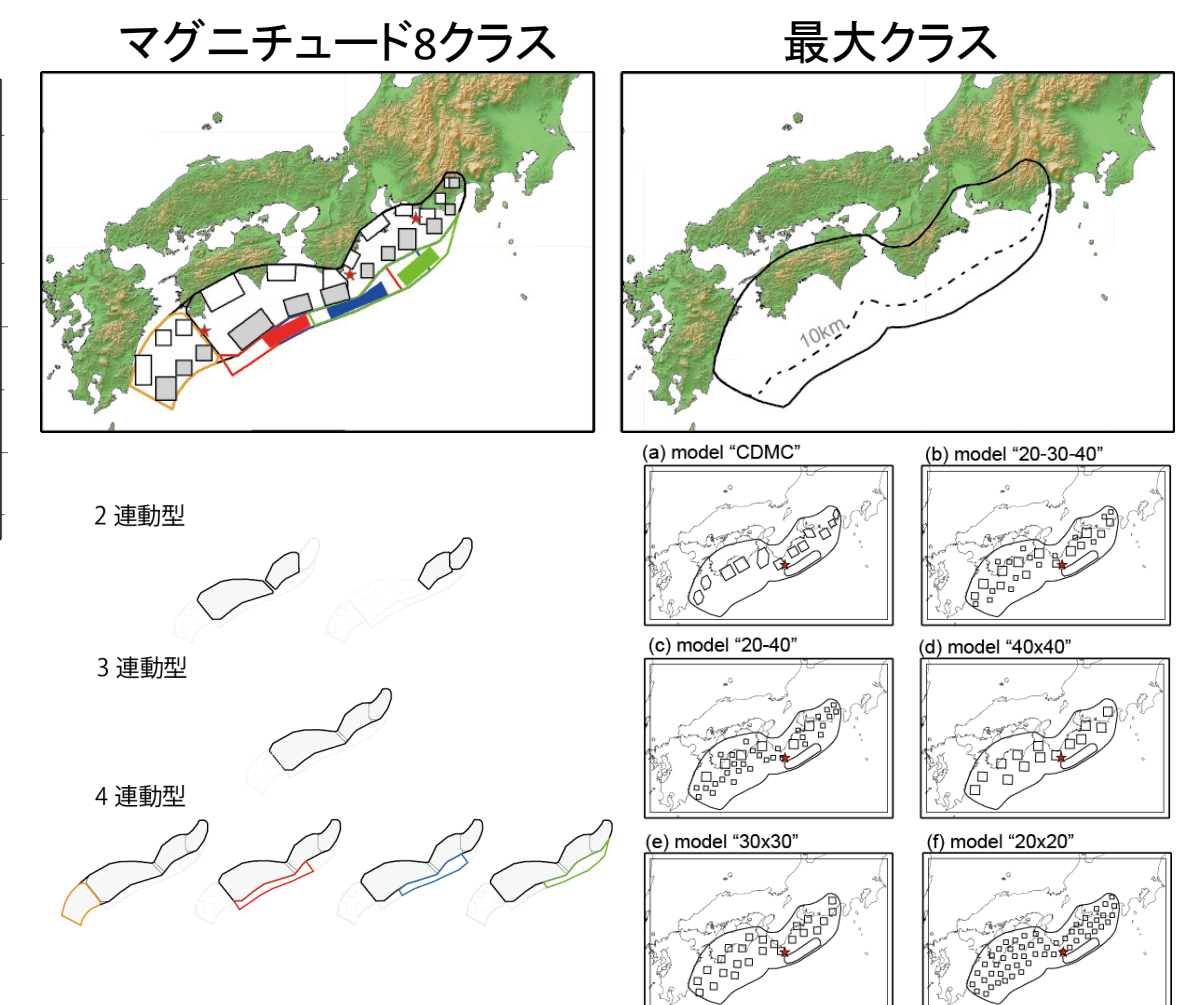


図7 南海トラフの巨大地震について、震源域の拡がり、アスペリティ配置、破壊開始点の不確実性を考慮した震源モデルの例。これらに対するシミュレーション結果と各シナリオの発生頻度を組み合わせることで、地震ハザード評価が行われる。