

地球シミュレータによる SEM を用いた全球地震波伝播シミュレーション

Spectral-Element Simulations of Global Seismic Wave Propagation using the Earth Simulator

坪井 誠司[1], Dimitri Komatitsch[2], Jeroen Tromp[2]

Seiji Tsuboi[1], Dimitri Komatitsch[2], Jeroen Tromp[2]

[1] 固体地球統合フロンティア, [2] カルテク

[1] IFREE, [2] Caltech

はじめに

スペクトル要素法 (SEM) は、運動方程式の弱形式に基づき有限要素法と pseudospectral 法の利点を兼ね備えた数値解法で、Komatitsch and Tromp (2002)により 3D 地球モデルに対する地震波の伝播へ使われるようになった。本研究では、2002 年 4 月より利用が開始された地球シミュレータ上で、SEM による地震波伝播シミュレーションを実施したので、その最新の結果について発表する。

方法

今回用いたプログラムは、Komatitsch and Tromp (2002)が 3D 地球モデルに対して開発したもので、地震波速度、密度の 3 次元構造、3 次元地殻構造モデル、楕円体の形状、地形、海洋、自転、自己重力、非等方性、減衰など、すべてのパラメータを取り込むことが可能となっている。プログラムは、並列計算機を使用することを前提としており、地球モデルを 6 個のブロックに分けそのブロックをさらに分割して、それぞれのブロックに MPI により CPU を割り振り、メッシュ内の変位を計算する。地球シミュレータは、640 個のノードからなり、各ノード内は 8 個のベクトルプロセッサを有している。各プロセッサ間の並列化は MPI により行うので、SEM による地震波伝播シミュレーションプログラムは地球シミュレータに適したプログラムであるといえる。一方、地球シミュレータの性能を最大限引き出すためにはベクトル化のチューニングが必要である。ここでは、最内側のループで呼ばれている関数を含めて可能な限りベクトル化を進め、地球シミュレータに適したプログラムへの変換を実施した。

計算結果

地球シミュレータでは、利用可能なノード数をプログラムのベクトル化率と並列化率により算定している。SEM による地震波伝播シミュレーションプログラムは並列化率が高く、200 ノード以上の利用が可能だったので、243 ノードを用いて周期 5 秒までの地震波を計算することを試みた。周期 5 秒までを選んだのは、球対称モデルにおける正規モード解の重ね合わせによる理論地震波形記録が、現在は周期 8 秒程度までが限界となっているからである。243 ノード(1944 プロセッサ)を使用する場合、ブロックは $18 \times 18 \times 6 = 1944$ となるように分割する。それぞれのブロックでは 1 辺を 864 個に分割してメッシュを作成し、全体の節点の数は約 55 億個である。地震は M 7 程度までは点震源を仮定し、それより大きな地震に対しては複数の点震源を空間及び時間的に分布させて有限の断層の効果をモデル化した。観測点は FDSN の観測点リストにある約 600 点の観測点を選んだ。各観測点の 3 成分の地震記録 30 分を計算するために地球シミュレータの 243 ノードを用いた計算では約 6 時間かかった。計算した理論地震記録を観測された波形記録と比較すると、両者は多くの観測点でよく一致しており、SEM により計算した理論地震波形記録が地球内部構造及び震源過程の研究に非常に有意義であることを示している。特に、現実的な 3D 地球モデルに対して周期 5 秒までの理論地震記録を数値的に計算できるようになったことは、準解析的な手法である正規モード解の重ね合わせによる理論地震記録の精度を数値的手法による理論記録が上回ったことになり、今後の地震学の研究手法に大きな影響を及ぼすと予想される。