

大規模マルチスケール地震発生サイクルシミュレーションの高速化手法 Fast computational methods for large- and multi-scale earthquake cycle simulations

平原 和朗^{1*}, 大谷 真紀子¹, 兵藤 守², 堀 高峰²
Kazuro Hirahara^{1*}, Makiko Ohtani¹, Mamoru Hyodo², Takane Hori²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 海洋開発研究機構
¹ Grad. School Science, Kyoto University, ² JAMSTEC

我々は、最近、摩擦実験から得られた速度・状態依存則に基づく、準動的地震発生サイクルシミュレーションの高速化・省メモリ化に取り組んでいる。本講演では、地震発生サイクルシミュレーションの高速化・省メモリ化の必要性と各手法の概要・特徴および開発の現状について報告する。

高速化・省メモリ化の必要性は主に以下の2つの要請から来ている。1) 大規模マルチスケールシミュレーション: 最近、南海トラフ巨大地震サイクルシミュレーション (Hori, 2006) に見られるように、大領域を扱うようになってきた。また、現状では大きなアスペリティー数個を対象にしたシミュレーションが主流であるが、色々なサイズの地震や南海トラフ震源域深部で発生する各種スロースリップイベントに代表される多様なすべり現象まで説明する、大規模階層的マルチスケールシミュレーションを行う必要がある。2) データ同化手法を用いた予測シミュレーション: 現状では、試行錯誤的に摩擦パラメータ分布を推定して、実際に発生した地震発生系列を再現する地震発生サイクルシミュレーションを行っている (例えば, Kato, 2008)。地震発生の将来的な予測には摩擦パラメータに加え、物理パラメータの初期値の推定が必須である。また予測精度の議論には推定値の確からしさについての尺度が必要である。このためには、気象・海洋学分野で用いられているデータ同化手法を組み込んだ予測シミュレーションシステムを構築する必要がある。シミュレーションでは、プレート境界をN個の小さなセルに分割して、 $N \times N$ すべり応答関数行列とすべり遅れ速度ベクトル積の計算が繰り返し現れ、この計算に要する計算時間およびメモリ容量は $O(N^2)$ となり、南海トラフのような大領域における地震サイクル計算やデータ同化を含む予測シミュレーションでは、Nが大きな大規模繰り返し計算となる。我々は、他分野で開発された手法を適用して、この密行列・ベクトル積の高速化・省メモリ化に取り組んでいる。

本講演では、均質弾性体におけるすべり応答関数行列・ベクトル積の高速化手法として、高速フーリエ変換法 (FFT)、高速多重極法 (FMM) および階層型行列 (Hierarchical Matrices: H-matrices) 法を取り上げ、その概要と特徴について述べる。FFTは地震サイクル計算でも良く用いられ (例えば, Kato, 2008)、メモリ量は $O(N)$ 、計算量は $O(N \log N)$ となり、省メモリで高速計算が可能である。しかしながら、FFTを適用するには、繰り返し境界条件が必要である。沈み込み帯でのシミュレーションでは、海溝軸に沿った方向には繰り返し境界条件の仮定が可能であるが、地表を含む深さ方向への適用には問題がある。FMMは天体物理学におけるN体問題での長距離相互作用の高速計算のために開発され、多くの問題に適応されてきた。しかしながら、地震発生シミュレーションでは我々とTullis and Beeier (2008) 以外の研究では用いられていない。FMMではすべり応答関数の多重極展開により、遠くの多くのソースおよびレシーバセルの寄与をまとめて評価してあたかもひとつのセルからの寄与のように扱うことを可能にし、高速化を図っている。FMM計算ではメモリ量および計算量は $O(N)$ となる。我々は、Yoshida et al. (2001) によるFMMの定式化とLiu and Nishimura (2006) による4分岐木構造アルゴリズムに基づき、均質無限媒質におけるすべり応答関数行列とすべり (速度) ベクトルの積の計算にFMMを用いたコード開発を行った。FMMは繰り返し境界条件を必要としないが、すべり応答関数が多重極展開可能な関数形を持つ必要があり、全無限均質弾性体ではこの条件を満たしている。ところが、地表を含む半無限均質弾性体での傾斜境界での縦ずれ成分を含むシミュレーションでは、多重極展開に適した形が得られていない (大谷・他, 2010)。H-matrices (Hackbusch, 1999) は、密行列を階層的な正方行列に分解し、各小行列を低ランク行列で近似したもので、行列ベクトル積などの行列演算を小さなメモリ量で高速に行うことができる。Ohtani et al. (2011) では、Hori (2006) の地震サイクルシミュレーションコードにH-matrices法を実装し、セルサイズ $10^{**}6$ まで調べている。精度やメモリ量を制御するパラメータを適切に取る必要があるが、メモリ量は $O(N)$ 、計算量は $10^{**}5$ 程度までは $O(N)$ 、それを越えると $O(N) \sim O(N \log N)$ となる。H-matrices法は、すべり応答関数がソースとレシーバセルの距離に応じて減衰する性質を持てば良く、FMMのように関数形に制限はなく、実装したコードでは、半無限均質媒質での三角要素セルに対するすべり応答関数を用いている。将来的には、FEM等を用いた不均質弾性媒質中でのすべり応答関数を用いることも可能で、均質のみならず不均質を有する、沈み込み帯での大規模マルチスケール地震発生サイクルシミュレーションに威力を発揮すると期待される。

キーワード: 大規模マルチスケール地震発生サイクルシミュレーション, 高速化, 高速フーリエ変換法, 高速多重極法, 階層型行列

Keywords: Large- and multi-scale earthquake cycle simulatio, Fast computation methods, Fast Fourier Transform Method, Fast Multipole Method, H-matrices