

10-NA07

## 巨大地震発生サイクルシミュレーションの高度化

平原 和朗 (京都大学大学院理学研究科)

岩石実験から得られたすべり速度と状態に依存する摩擦構成則に基づく、地震発生サイクルシミュレーションにより、地震発生予測に向けて研究が進められている。特に、南海トラフ沿いに発生する巨大地震により大被害を被っている西南日本では、今後30年以内に次期巨大地震の発生が危惧されている。最近、震源域深部でゆっくり地震が観測され、その発生メカニズムが注目を集めているが、巨大地震発生前にその地震活動様式が前兆的に変動する可能性がある。また巨大地震震源域はこれまで駿河湾から足摺岬沖とされていたが、西方は日向灘まで及ぶ可能性がある。このように、大規模マルチスケール地震サイクルシミュレーションの必要性が増している。このため、今年度は主として H-matrices 法の適用を検討した。その結果、分割したセル数を  $N$  とすると、H-matrices 法を適用した場合、オリジナルコードの  $O(N^2)$  から  $O(N)$  に高速化・省メモリ化できることが分かった。

### 1. 研究の目的と意義

日本列島は4つのプレート（太平洋・フィリピン海・北米・アムール（ユーラシア）プレート）が収束する沈み込み帯に位置し、東北日本では東から太平洋プレートが日本海溝沿いに、西南日本では南からフィリピン海プレートが南海トラフ沿いに沈み込んでいる（図1）。これらのプレートの沈み込みにより、およそ百年間隔で海溝沿いにプレート間巨大地震が発生し、人的・物的被害を含む大災害を引き起こしている。

特に、南海トラフでは今世紀前半に巨大地震の発生が危惧され、被害は西南日本全域に及びその被害総額は国家の財政規模に相当すると試算されている。また、1995年兵庫県南部（神戸）地震に見られるように、南海トラフ巨大地震発生の前50年から後10年の間に西南日本内陸活断層での地震活動が高まることも報告され、南海トラフ巨大地震による被害に加え、内陸地震による大被害も危惧されている。

こういった状況の中、最近、プレート間巨大地震の発生予測を目指して、岩石実験から導かれた摩擦構成則に基づき、プレート間巨大地震発生サイクルシミュレーションが行われている。摩擦は身近な物理現象であるが、実は地震発生に大きな役割を果たしている。地震は断層におけるこの摩擦現象であるとの認識に立ち、1960年代後半

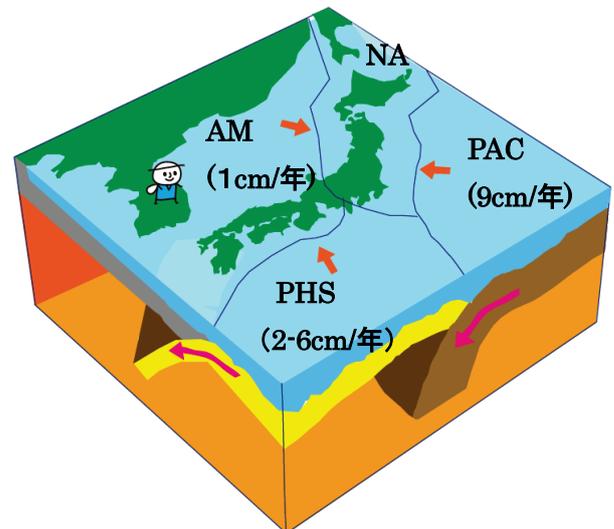


図1 プレート収束帯としての日本列島  
PAC:太平洋プレート、  
PHS:フィリピン海プレート  
AM:アムールプレート  
NA:北米プレート  
カッコ内は収束速度を表す。

から岩石の摩擦実験が行われ、色々な摩擦則が提出されてきた。その中で、すべり速度と接触面の状態に依存する摩擦構成則には、断層面の強度が回復する固着過程が含まれ、地震がプレート境界や断層で繰り返し発生し発生する現象、すなわち地震発生サイクルシミュレーションに良く用いられている。1980年代から、この速度・状態依存的

摩擦則に基づき、プレート運動を原動力とする、地震発生サイクルシミュレーションが行われてきた。当初は計算機の能力の関係から小規模で単純なモデルシミュレーションであったが、計算機の性能と相まって、最近では実際の歴史地震の発生履歴の再現に見られるように、大きな成果を挙げている。

しかしながら、現状は、プレート境界に分布させる摩擦パラメータの推定は試行錯誤的に探索している地震発生サイクルシミュレーションの段階であり、次のステップとして、気象海洋分野で開発されたデータ同化手法の導入による地震発生予測シミュレーションシステムの構築を考える段階にある。しかし、データ同化手法を用いた摩擦パラメータの推定にはフォワード計算を繰り返す必要がある、膨大な計算時間を要する。

また、特に西南日本の震源域深部で最近観測されている様々なゆっくり地震（時定数が1から数年に及ぶ長期的スロースリップ、時定数が数日程度の短期的スロースリップ、通常の地震より低周波が卓越する低周波地震）の活動は、巨大地震発生前に前兆的変動を示す可能性が指摘されており、巨大地震発生サイクル中での種々のスロースリップ活動変化を含むマルチスケールプレート間地震サイクルシミュレーションを行う必要がある。

さらに、これまで南海トラフ巨大地震震源域は、東は駿河湾から西は四国西部の足摺岬沖まで及ぶと考えられてきた。しかしながら、大分県龍神池における津波堆積物の解析や1707年宝永地震の津波波高分布から、津波波源域の西端は日向灘域にまで達する可能性が指摘されている。このように、従来モデルより大きな領域を扱う大規模シミュレーションを実行する必要がある。

こういったデータ同化やマルチスケール地震発生サイクルシミュレーションには長大な計算時間および大容量のメモリーを要し、現在のシミュレーション手法では南海トラフといった広領域での現実的な計算は不可能である。このため、本研究では、地震発生サイクルシミュレーションコードの高速化・省メモリー化を図る。

また前に述べたように、プレート間地震に加え内陸地震の発生も考慮するには、地震時における弾性応答のみならず、地殻下部やマンツルの粘弾性による時間遅れを考慮する必要がある。さらにプレートの沈み込みにより日本列島下には大きな不均質構造が作り出されている。現状のシミュレーションでは均質半無限弾性体を仮定しており、粘弾性や不均質性の影響は考慮されていない。我々はいままで地球科学分野での不均質媒質を扱うため大規模並列有限要素法コードGeoFEMを開発してきた。そこで、3次元不均質粘弾性媒質中での内陸地震との相互作用を含むプレート間巨大地震サイクルシミュレーションに向けて、このGeoFEMにFEMメッシュ細分化機能を新たに追加開発し、すべり応答関数計算コードを開発する。

上記は主として本研究の必要性や具体的な研究目的に関するものであるが、本研究の社会的意義としては以下の事項が挙げられる。

地震調査本部から公表されている地震発生長期予測（今後30年間に発生する確率）地図を見ると、東北日本では宮城県沖地震が99%、西南日本では南海・東南海・東海地震が50-70%と高い値を示している。こういった領域では、地震発生に伴い大きな人的・物的被害が想定され、その災害軽減が急務である。本研究の意義として、こういった領域で行われている、過去の地震履歴を再現する現状の地震発生サイクルシミュレーションを、データ同化手法を用いたマルチスケール地震発生予測シミュレーションへと高度化させ、次に発生する地震について発生時期・規模等について確率的情報を提供し、これらの情報を基にした強震動予測や津波予測を通して、災害軽減へ役立たせることが考えられる。また、内陸地震は規模が小さいが、1995年神戸地震のように都市直下で発生すると大災害をもたらす。しかしながら、内陸地震発生サイクルシミュレーションは未だ手つかずの段階である。西南日本の内陸活断層に発生する内陸地震は、南海トラフ巨大地震サイクルの中でその活動度が変化し、南海トラフ巨大地震発生前後でその活動度が高まる。内陸地震は東西圧縮

応力により引き起こされ、フィリピン海プレート  
の沈み込みに起因する  $N50^{\circ} W$  の方向の圧縮応  
力場とは異なる。このように、直接フィリピン海  
プレートの沈み込みが内陸地震を引き起こしてい  
る訳ではないが、粘弾性を考慮した南海トラフ巨  
大地震と内陸地震の相互作用を含む地震発生サイ  
クルシミュレーションの開発を通じて、内陸地震  
発生予測への手掛かりとなる可能性がある。

## 2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究は、京都大学理学研究科・海洋開発研究  
機構・東京大学情報基盤センター・京都大学学術  
情報メディアセンターからなる、超大規模数値計算  
系応用分野における、学際大規模情報基盤共同利  
用・共同研究拠点公募型共同研究である。

これまで、地震発生サイクルシミュレーション  
コードは地震学者により開発されてきたが、デー  
タ同化やより大規模なマルチスケールシミュレ  
ーションのためのコードの高速化・省メモリー化、  
および不均質粘弾性媒質中での地震発生サイクル  
シミュレーションに必須である FEM メッシュの細  
分化のコード開発は、情報分野の研究者の協力が  
必須であり、本拠点公募型共同研究として実施す  
る次第となった訳である。

具体的な役割分担として、地震学研究者からな  
る京都大学理学研究科および海洋開発研究機構で  
は、文部科学省委託事業「東海・東南海・南海地  
震の運動性評価研究」での「物理モデル構築及び  
地震発生シミュレーション研究」を担当している。  
本研究では、主として、核となる地震発生サイク  
ルシミュレーションコードやその物理モデルを提  
供し、京都大学学術情報メディアセンターとは、  
大規模マルチスケール地震発生サイクルシミュレ  
ーションに向けて、コードの高速化・省メモリー  
化についての共同研究を行う。また、東京大学情  
報基盤センターとは、3次元不均質粘弾性媒質中  
での内陸地震との相互作用を含むプレート間巨  
大地震サイクルシミュレーションに向けて、FEM メ  
ッシュ細分化コードを含むすべり応答関数計算コ  
ードを共同開発する。

## 3. 研究成果の詳細

成果の概要を述べる前に、地震発生サイクルシ  
ミュレーションの実際について、簡単に述べる。  
まず、沈み込むプレートの3次元形状を設定し、  
プレート境界にプレート沈み込み速度および摩擦  
パラメータを与える。プレート境界における、沈  
み込みからのすべり遅れによる応力と速度・状態  
依存摩擦則に従う摩擦力の釣り合いから得られる  
弾性体の準静的運動方程式を時間積分し、すべり  
の時空間発展を追う。この際、プレート境界を小  
断層（セル）に離散化するが、摩擦パラメータか  
ら決まる小さな小断層に分割する必要がある  
（Rice, 1993）。

上記の計算に現れる、セル  $i$  での応力の時間微  
分計算には、すべり応答関数行列とすべり遅れ速  
度ベクトル積

$$\sum_j K_{ij} (V_j(t) - V_{pl,j}) \quad (1)$$

を計算する必要がある。ここで、 $V_j, V_{pl,j}, K_{ij}$  は、  
それぞれ、セル  $j$  でのすべり速度、プレート収束  
速度、およびセル  $j$  での単位すべりによるセル  $i$   
での応力変化（すべり応答関数： $K_{ij}$ ）である。この  
計算は、地震発生サイクルシミュレーションでは  
繰り返し行う必要があり、この部分の高速化・省  
メモリー化が必須である。分割したセルの数を  $N$   
とすると、この計算には、 $O(N^2)$  の演算回数および  
メモリー容量を要する。これまで、問題の空間対  
称性を利用して FFT を用いて高速化することが  
試みられているが（例えば、Kato, 2008）、沈み込  
み帯では、深さ方向にもトラフ軸方向にも対称性  
を考えられないので、その適用には限界がある。

本研究では、高速多重極法 (FMM) と Hierarchical  
Matrices (H-matrices) 法による高速化・省メモ  
リー化を行おうとしている。主として H-matrices  
法による開発を行ったが、まず高速多重極法によ  
る試みの現状を述べる。

### 3.1 高速多重極法 (FMM: Fast Multipole Method)

高速多重極法は、ラプラス場やヘルムホルツ場などにおける  $N$  体間減衰相互作用の高速計算数値アルゴリズム ( $N^2$  の演算回数を  $O(N)$  の演算回数で行う) で、天体物理学をはじめとして多くの分野で用いられているが、地震発生サイクルシミュレーションでは、Tullis & Beeier(2008)、平原・他(2009)以外にはまだ用いられていない。

平原・他(2009, 2010)では、無限均質弾性体中における平面断層でのコードの開発を行った。FMMでは、プレート境界面または断層面を  $2^D$  分岐 (tree) 構造 ( $D$  は次元で、この場合、曲面なので  $D=2$ ) に分割する必要があるが、その実際的なアルゴリズムについては、Liu and Nishimura(2006)のチュートリアルコードを参照した。また、3次元静弾性問題における基本解の多重極展開および局所展開の計算については、Yoshida et al. (2001)を参照した。

現状のコードでは、メモリー容量および演算時間は、 $O(P^2 * N)$ ,  $O(p * N)$  となっている。ここで、 $p$  は多重極展開の次数である。しかしながら、 $N$  依存性は同じ傾向を示しているが、FFT に比べると1回毎の演算時間が多く (図2)、また展開次数によるFMMの精度が振動するといった現象が見られ改善する必要がある。

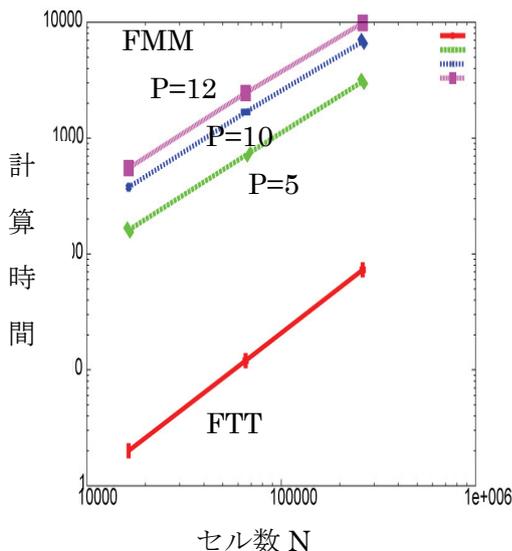


図2 FMM (P=5,10,12) と FTT の  $N$  と計算時間の比較

さらに、上記は無有限媒質中でのすべり応答関数についてであるが、半無限弾性体中でのすべり応答関数は多重極展開に適した形で得られないため、近似する必要がある。その場合、特に傾斜断層上での縦ずれ断層運動において高速多重極法適用の困難さが、大谷・他(2010)で指摘されている。

### 3.2 H-matrices 法の適用

H-matrices とは、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、密行列を有効に圧縮した元の行列に比べて疎な近似行列表現である。この構造に基づき、行列ベクトル積などの行列演算を小さなメモリー量で高速に行うことができる。なお、H-matrices 作成および演算に必要なライブラリー (HLib) は、マックスプランク研究所から公開されている (<http://www.hlib.org/hlib.html>)。

Hori (2006)による地震サイクルシミュレーションコード RSGDX は、 $N \times N$  すべり応答関数行列の計算を行う部分とこの行列を入力して各セルにおけるすべり発展を計算する部分に分かれている。まず、HLib を用いて、すべり応答関数行列を H-matrices 表現により圧縮して出力するように改良した。この部分は、並列化されていない。従って、T2K オープンスーパーコンピュータシステムでは、1 ノードの共有メモリーで使用できるのは 28GB なので、圧縮効率にもよるがおよそ  $N=1,900,000$  セルくらいまでの計算が上限となる。これに対し、すべり発展を計算する部分は並列化を行っている。以下では 64PE を用いて計算を行っている (大谷・他, 2010b, Ohtani et al., 2010)。

半無限均質弾性媒質中に傾斜角  $10^\circ$  の平面プレート境界 (600km $\times$ 240km) を設定し、 $N=32,000$  個の3角形セルに分割した際のすべり応答関数行列を例に、H-matrices 作成の手順を述べると以下のようなになる：

- 1) セル番号の並び替え：できるだけ距離の近いセル同士が連なるように、セル番号を並び替える。
- 2)  $\eta$ -admissibility 条件 ( $\min\{\text{diam}(Q_r), \text{diam}(Q_s)\} \leq \eta \text{dis}(Q_r, Q_s)$ ) による小行列への分割： $n \times n$  小行列  $M$  の  $n$  個のレシーバおよび  $n$  個のソースセ



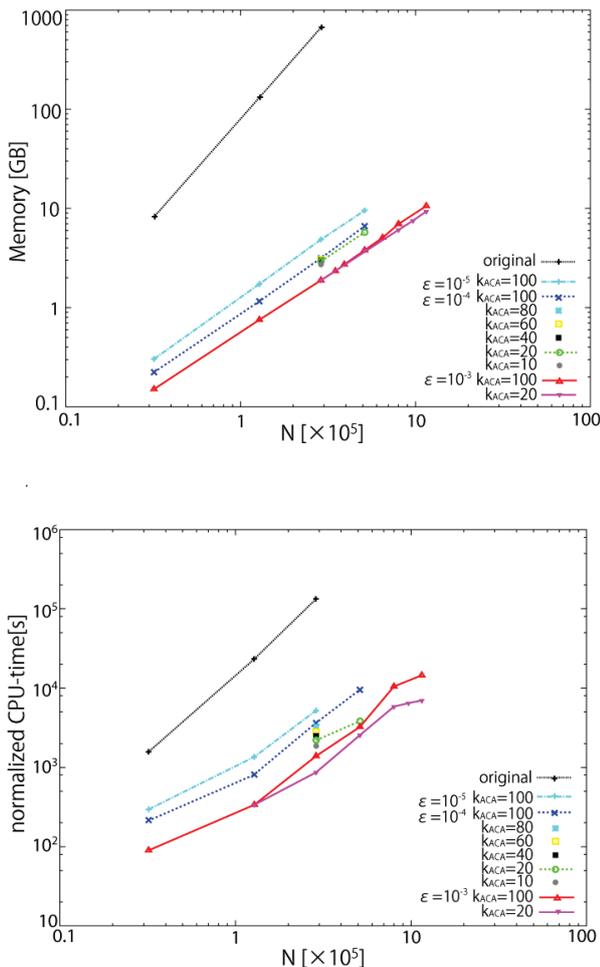


図4 上図：メモリーサイズの  $N$  依存性  
 下図：計算時間の  $N$  依存性

実は、これまで述べてこなかったが、**H-matrices** を構築する際にもう一つパラメータ  $k_{ACA}$  を用いている。**admissible** 小行列のランクの決定は、主として  $\epsilon_{ACA}$  によるが、それに加えて **admissible** 小行列の取り得る最大のランク  $k_{ACA}$  を指定している。これまでは  $k_{ACA}=100$  を用いてきた。**admissible** 小行列の各要素に対応するソースセルと観測セルの距離は大きいいため、その絶対値は小さい。**admissible** 小行列の近似精度を相対誤差で見積もっているため、応力評価と言う点ではランクを落としてもそれ程大きな誤差を生じないと期待される。

そこで  $N=288,000$ 、 $\epsilon=10^{-4}$  の場合、 $k_{ACA}=10,20,40,60,80$  と変化させて、すべり速度の時間履歴を  $k_{ACA}=100$  の場合（この場合はランクは  $\epsilon_{ACA}$  で決まっている）と比較してどこまで落とせ

るか検討した。ここでは図に示していないが、その結果、 $k_{ACA}=20$  以上であれば十分な精度を持っていることが分かった (Ohtani et al., 21010)。図4には、 $k_{ACA}$  を変化させた時の計算時間も記しているが、 $k_{ACA}=20$  では、計算時間を  $O(N)$  に抑えているのが分かる。

このように **admissible** 小行列のランクを抑えることで計算精度を保ちながら、計算時間を  $O(N)$  に抑えることが可能であることが分かった。

### 3.3 粘弾性媒質中での地震発生サイクルシミュレーション

GeoFEM は6面体要素しか扱えなかったがプレート形状を容易に扱えるように4面体要素を使えるように改造している。それに合わせてメッシュ細分化コードを開発する予定である。そのため、成層構造粘弾性媒質中での地震発生サイクルシミュレーションの検討を行った。

### 4. これまでの進捗状況と今後の展望

今年度は、主として、**H-matrices** 法をすべり応答関数行列に適用して、地震発生サイクルコードの高速化・省メモリー化を図った。その結果、**admissible** 小行列のランクを抑えることで、計算精度を保ちつつ、メモリーサイズおよび計算時間を  $O(N)$  に抑えることが可能であることが分かった。このように、**H-matrices** 法の適用により、データ同化や百万セルオーダーの大規模マルチスケールシミュレーションへの道が開けたと言える。本研究では平面境界のみを扱ったが、今後は、屈曲する曲面形状を持つフィリピン海プレートに適用してその有効性を検証する必要がある。

高速多重法 (FMM) の適用については、半無限媒質への適用が現状では困難であり、無限媒質中でのすべり応答関数行列を用いての開発等検討を要する。FEM を用いた不均質粘弾性媒質中での地震発生サイクルシミュレーションのための FEM メッシュ細分化コードは、その設計を終えた段階であり、今後実装に向けて作業を行う必要がある。

## 5. 研究成果リスト

### (1) 学術論文 (投稿中のものは「投稿中」と明記)

Ohtani, M., K. Hirahara, Y. Takahashi, T. Hori, M. Hyodo, H. Nakashima and T. Iwashita, 「Fast Computation of Quasi-Dynamic Earthquake Cycle Simulation with Hierarchical Matrices」submitted to *Procedia Computer Science*, 2011.

### (2) 国際会議プロシーディングス なし

### (3) 国際会議発表

Hirahara, K., Y. Kaneda and T. Furumura (invited), 「Research project for the next Nankai megathrust earthquake, southwest Japan」, 8<sup>th</sup> Asian Seismological Commission General Assembly, Hanoi, 2010.

Ohtani, M., K. Hirahara, Y. Takahashi, T. Hor,I, M. 鳴 Hyodo, H. Nakashima and T. Iwashita, 「Large-scale quasi-dynamic earthquake cycle simulation with H-matrices」, The 8<sup>th</sup> Asian Seismological Commission General Assembly, Hanoi, 2010.

Shikakura, Y., Y. Fukahata, N. Mitsui and K. Hirahara, 「3-D cell model simulation of the inland earthquake generation pattern in Southwest Japan during the Nankai earthquake cycles in a layered viscoelastic medium」, American Geophysical Union 2010 Fall Meeting, San Francisco, 2010.

### (4) 国内会議発表

平原和朗・大谷真紀子・光井能麻・堀高峰、「高速多重極法を用いた無限均質弾性体中での大規模地震発生サイクルシミュレーション」、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、幕張、2010a.

大谷真紀子・平原和朗、「三次元均質半無限弾性体を仮定した地震サイクルシミュレーションにおける高速多重極法 (FMM) を用いた応力計算法の開発」、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、幕張、2010a.

平原和朗・大谷真紀子・高橋康人・堀高峰・兵藤守・中島浩・岩下武史、「地震発生サイクルシミュレーションコードの高速化：(2) Hierarchical Matrices 法の適用」、日本地震学会 2010 年秋季大会、広島、2010b.

大谷真紀子・平原和朗・高橋康人・堀高峰・兵藤守・中島浩・岩下武史、「H-matrices を用いた大規模準動的な地震発生サイクルシミュレーション」、日本地震学会 2010 年秋季大会、広島、2010b.

鹿倉洋介・深畑幸俊・光井能麻・平原和朗、「成層粘弾性を仮定した南海トラフ地震サイクル中での西南日本内陸地震発生様式のセルモデルシミュレーション」、日本地震学会 2010 年秋季大会、広島、2010.

### (5) 謝辞

本研究は文部科学省による「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究」および「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の支援を受け行われました。