

jh130022-NA14

## 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）

日本列島は 1995 年兵庫県南部地震以降、2011 年東北地方太平洋沖地震を経て、次期南海トラフ巨大地震の発生へとつながる、大地動乱の時代にあると言える。こういった状況で日本列島の変動予測は喫緊の課題と言える。プレート運動を原動力とし、岩石実験から得られた速度状態依存の摩擦則に基づく、地震発生サイクルシミュレーションが行われ、M7-8 および M9 クラスの個々の地震については理解が進んできたが、日本列島規模の巨大地震の相互作用については未だ手つかずの状態である。また地震の大きさとその発生頻度にはグーテンベルクーリヒター則と呼ばれるべき乗則がなりたっているが、現在の地震サイクルシミュレーションは多様な大きさを含む地震発生の相互作用を組み込めていない。これらの問題の解決に向けて、1) 小さな地震と大きな地震を含む階層マルチスケールアスペリティモデルによる、地震発生サイクルシミュレーション、2) 列島規模での海溝型地震サイクルシミュレーションの研究に着手した。また、3) 摩擦パラメータの推定や次期巨大地震発生予測に向けて地殻活動予測システムの構築にも取り組んでいる。これらの問題は超大規模計算となり、計算科学的な視点では、H-matrices 法を用いてのハイブリッド並列計算による省メモリ化・高速化が鍵となる。

### 1. 研究の目的と意義

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み、およそ数十年～百年間隔でマグニチュード (M) 7～8 のプレート間大地震が発生している。1995 年兵庫県南部地震の発生以降、日本列島の地殻活動は大きく変化している。こういった状況で、2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震はモーメントマグニチュード (Mw) 9.0 の超巨大地震で、500km x 200km の広い領域を破壊し、海溝近くに 50m を超えるすべりおよび巨大な津波を発生させ、未曾有の大災害をもたらした (図 1)。津波堆積物の分析からこういった超巨大地震の再来間隔は数百年と見積もられている。この超巨大地震は日本列島全域に大きな応力擾乱を与え、2004 年スマトラ沖地震 (M9.1) に見られるように、今後 10 年程度は震源域周辺のみならず、日本列島全域で地震活動が活発化することが考えられる。また、西南日本の南海トラフ (図 1) では今世紀前半に巨大地震の発生が危惧されているが、東北地方太平洋沖地震の発生を受けてその規模・被害予測について見直しが行われている。

このように、日本列島は 1995 年兵庫県南部地震

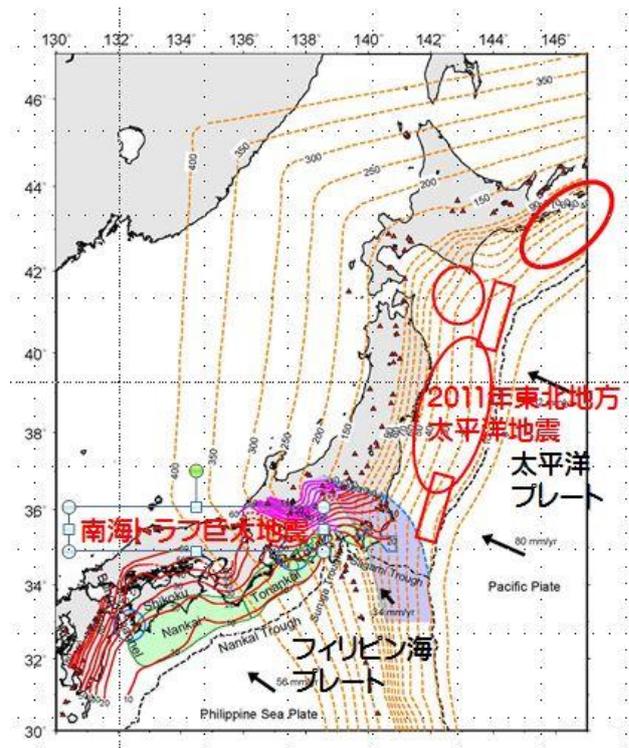


図 1 太平洋プレートとフィリピン海プレート上面の等深線と 2011 年東北地方太平洋沖地震・南海トラフ巨大地震震源域

Hirose (<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/sv/2ken/fhirose/index.html>) を改変

以降、2011 年東北地方太平洋沖地震を経て、次期南海トラフ巨大地震の発生へとつながる、大地動

乱の時代にあると言える。

こういった状況の中、岩石実験から導かれた摩擦構成則に基づき、プレート運動を原動力とした、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、東北地方太平洋沖地震発生機構の解明や南海トラフ巨大地震の発生予測を目指して研究が進められている。現状は、過去の履歴を再現する摩擦パラメータの推定を試行錯誤的に探索している段階であり、次のステップとして、大気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ステムの構築を考える段階にあると言える。

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スロースリップの活動は、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大規模マルチスケール地震サイクルシミュレーションを行う必要がある。

更に、前述したように 2011 年東北地方太平洋沖地震の発生は日本列島全域に大きな応力擾乱をもたらし、列島全域の地震活動に大きな影響を与えている。現状では、例えば東北地方太平洋沖震源域と南海トラフ震源域を別個にモデル化してきたが、太平洋プレート及びフィリピン海プレートが沈み込む日本列島全域に及ぶプレート境界をモデルに含めた地震発生サイクルシミュレーションモデルの構築も視野に入れる必要がある。日本列島モデルを考える時に日本海溝沿いに沈み込む太平洋プレートと南海トラフ沿いに沈み込むフィリピン海プレートを考える必要があるが、日本海溝では水深 7km、南海トラフでは水深 4km といった水深の違いのため、現状の半無限弾性体でのすべり応答関数を用いたシミュレーションでは問題が生じる。任意の地表面形状を持つ均質弾性媒質での計算法を開発する必要がある。

また、色々なマグニチュード ( $M$ ) の地震が発生しており、地震のマグニチュードが  $M$  と  $M+dM$  の間にある発生個数  $n(M) dM$  は、 $\log n(M) = a - bM$  という、地震の規模別頻分布を表すグーテンベルグーリヒター (GR) 則に従って発生している。  $b$  値の値はお

よそ 1 に近く、 $M$  が 1 増えると発生頻度はおよそ 1/10 になる。東北地方太平洋沖地震発生前に GR 則の  $b$  値が変化したとの報告もあり、 $M7$  クラス以上の地震のみならず小さな地震発生も考慮に入れる必要がある。こういった研究は膨大な計算時間を要するため、まだあまり行われていないが、様々な大きさのアスペリティを持つ階層マルチスケールアスペリティモデルによる地震発生シミュレーションを行う必要がある。

こういったデータ同化や超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は多大な計算メモリおよび長大な計算時間を要し、計算機科学的な側面としては、より省メモリ化・高速化が鍵となる。

更に現状は均質弾性媒質を用いているが、沈み込むプレートの影響により日本列島下には大きな不均質構造が存在する。これらの影響も考慮する必要がある。また、長距離相互作用を考える上では弾性応答のみならず粘弾性応答も考慮する必要がある。

## 2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

### (1) 共同研究を実施した拠点名および役割分担

本研究は、京都大学理学研究科・海洋開発研究機構・東京大学地震研究所・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。

### (2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

### (3) 当公募型共同研究ならではの事項など

これまで、マックスプランク研究所で開発された H-matrices 法ルーチンコード H-Lib を用いて高速化を図ってきたが、分散並列処理のサポートが不十分である等の問題があった。そこで、研究代表者も参画している JST CREST プロジェクトにおいて京都大学が独自に開発している H-matrices

法の分散並列コードを導入し、均質半無限弾性体中での地震発生サイクルシミュレーションを更なる大規模マルチスケール地震サイクルシミュレーションへと進化させることが可能になる。

### 3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

#### (1) 研究成果の詳細について

これまでの報告にも述べたが、以下に示すように、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き、プレート運動を駆動力とする地震発生サイクルシミュレーションを行なった。

半無限均質弾性体を仮定し、その中にプレート境界を設定する。プレート境界を  $N$  個の小さなセル (小断層) に離散化すると、各セル  $i$  での準静的運動方程式は次のように書ける。

$$\tau_i(t) = -\sum_j K_{ij}(u_j(t) - V_{pl,j}t) - \frac{G}{2\beta}V_i(t) \quad (1)$$

ここで、 $\tau_i(t)$ ,  $V_i(t)$ ,  $u_j(t)$ ,  $V_{pl,j}$ ,  $K_{ij}$ ,  $G$ ,  $\beta$  は、それぞれ、セル  $i$  でのせん断応力、すべり速度、セル  $j$  でのすべり、プレート収束速度、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)、剛性率、S 波速度である。これと、速度と状態に依存する摩擦則のうち、composite law (Kato and Tullis, 2006)

$$\tau_i(t) = \sigma_i \left[ \mu_* + \Theta_i(t) - a_i \ln(V_* / V_i(t) + V_* / V_i) \right] \quad (2)$$

$$\frac{d\Theta_i(t)}{dt} = \frac{b_i V_{pl,i}}{L_i} \exp \left[ -\frac{\Theta_i(t)}{L_i} \right] - \frac{V_i(t)}{L_i} \left[ \Theta_i(t) - b_i \left( \frac{V_{pl,i}}{V_i(t)} + \frac{V_{pl,i}}{V_*} \right) \right] \quad (3)$$

を連立させて各プレート境界セルにおけるすべりの発展をシミュレートする。実際には、式(1)と(2)を時間で微分し連立させ、速度の時間微分を得て、これを式(3)と連立させて、時間刻み幅可変の 5 次精度 Runge-Kutta 法により積分している。式(2)のように摩擦がすべり速度  $V_i(t)$  と状態変数  $\Theta_i(t)$  (その時間発展は式(3)に従う) との関数となっている。 $\sigma_i$  は法線応力で、式(2)の右辺第 2 項は摩擦係数となっている。速度と状態に依存す

る摩擦構成則と言われる所以である。また、ここで、 $a_i$  および  $b_i$  (または  $A_i = \sigma a$  および  $B_i = \sigma b$ ) は、各セル  $i$  に与える摩擦特性をコントロールするパラメータで、2つのパラメータの差 ( $a_i - b_i$  または  $A_i - B_i$ ) が正 (負) だと速度強化 (速度弱) を示し、すべり速度が増すと摩擦が増える (減少する)。また、 $L_i$  は特徴的すべり距離と呼ばれ、大きいほど破壊エネルギーが大きく破壊しにくくなる性質を持っている。これらの摩擦パラメータをプレート境界上に分布させ複雑な地震発生サイクルを再現する。

プレート境界を小さなセルに分割すると書いたが、この分割の影響が地震サイクル計算結果に影響を及ぼさないようにするには、分割サイズ  $h$  を、

$$h < h^* = cG \min. [L_i / \sigma_i (b_i - a_i)] \quad (4)$$

にとる必要がある (Rice, 1993) (ここで、 $c$  は分割するセルの形に依存する定数)。通常用いられているパラメータ範囲では、セルサイズは 1km 以下となる。

式(2)と(3)から分かるように、問題の非線形性による繰り返し計算の必要性に加えて、分割セルサイズの要請から来る、セル数の多さにより、地震発生サイクルシミュレーションは、多大な計算時間とメモリを要する。式(1)に見られる、すべり応答関数とすべりの行列・ベクトル積

$$\sum_j K_{ij}(u_j(t) - V_{pl,j}t) \quad (5)$$

の部分 (またはその時間微分したもの) の省メモリ化・高速化を開発中である。分割したセルの数を  $N$  とすると、これには、 $O(N \times N)$  のメモリおよび演算回数を要する。この行列・ベクトル積の演算に H-matrices 法 (Börm et al., 2009) を用いて、 $O(N) \sim O(N \log N)$  となる省メモリ・高速化を開発した (平原・他, 2011; Ohtani et al., 2011)。

#### 3.1 色々なサイズの地震を含む階層アスペリティモデルによる地震サイクルシミュレーション

これまでは M7-8 や M9 といったサイズの地震サ

イクルを扱ってきたが、実際には GR 則に従う様々な大きさの地震が発生している。アスペリティがひとつの場合、地震間では時間刻みは数箇月と大きいがすべり速度が大きくなる地震前から地震時において時間刻みは数千分の 1 秒のオーダーと変化する。サイズの異なるアスペリティを多く分させると、小さな地震の発生頻度は冪乗で増し、絶えず地震が発生している状態になり、時間ステップ数が膨大になり、計算時間が飛躍的に増す。これまでこういったシミュレーションがあまり試みられなかった理由はここにある。なお、この計算には式(2)(3)と異なる発展則 aging-law を用いている。

モデルは、均質全無限弾性体中の 45x45km のサイズを持つ断層面を 0.1x0.1km のサイズを持つ 405,000 個のセルに分割したもので、 $V_p1=5\text{cm/year}$  のローディング速度を与える。A-B>0 の速度強化摩擦特性をバックグラウンド域に与え、その中に以下の半径および特徴的すべり量をもつ大、中、小の A-B<0 のアスペリティを置く。

$$r_{\text{大}} = \sqrt{10^3 / \pi}, r_{\text{中}} = r_{\text{大}} / 3, r_{\text{小}} = r_{\text{中}} / 3$$

$$L_{\text{大}} = 0.0144m, L_{\text{中}} = 0.00481m, L_{\text{小}} = 0.00160m$$

この設定で、各アスペリティでの臨界半径  $r_c$  と各半径  $r$  の関係は  $r_c = r/3$  となっており、通常の地震を発生しうるアスペリティになっている。

様々な分布を試しているが、その中の数例を示す。A-Bは大アスペリティ内で一定で-0.2MPa、外側の速度強化域で+0.2MPa に設定してある。特徴的すべり量  $L$  を変化させており、図 2 に  $\log_{10}(L)$  分布 (frac15, 16, 18, 19) を示す。大きな  $L$  を持つ速度強化域で囲まれた円形の大アスペリティ内部に中・小アスペリティを配置している。アスペリティの個数は、frac15 では大 1、中 1、小 9 個、frac16 では大 1、中 0、小 9 個、frac18 では大 1、中 3、小 27、frac19 では大 1、中 0、小 27 個と、中があるスケールギャップが無い場合と有る場合を含んでいる。図 3 に発生した地震のマグニチュード  $M_w$  の時系列を示す。図 3 における色を示す、

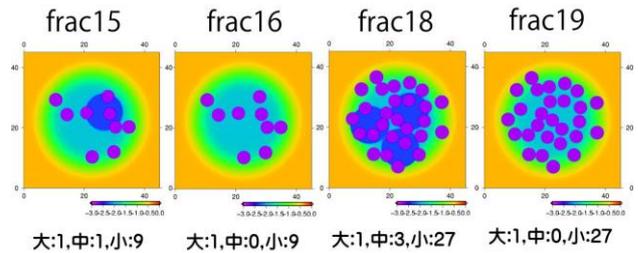


図 2 階層アスペリティモデルにおける  $\log_{10}(L)$  分布 (Ohtani et al., 2013)

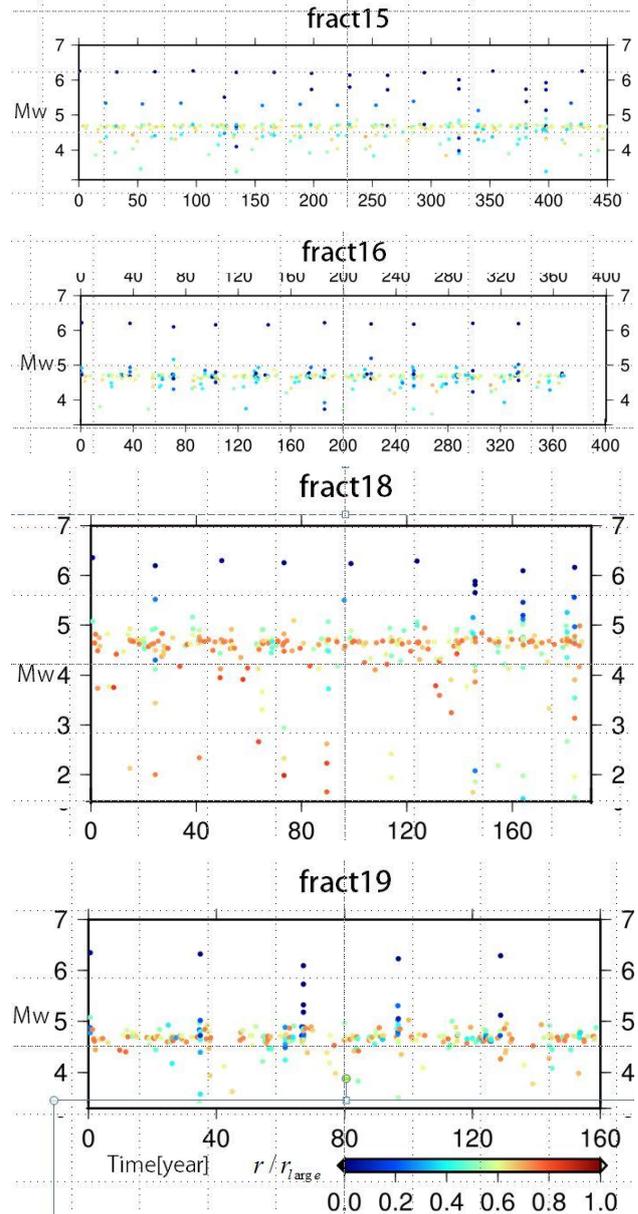


図 3 図 2 の各モデルによる地震サイクルシミュレーションでの  $M_w$  の発生時系列 (Ohtani et al., 2013)

$r/r_{\text{large}}$  の  $r$  は大パッチの中心から地震時にすべ

ったところまでの距離を表す。

現状は色々な階層アスペリティモデルでの地震サイクルシミュレーションを行なっている段階で、まだ系統的に結果を整理できていない。結果を羅列している段階であるが、大地震発生後サイクルの 1/3 期間の間は地震が少ないが、だんだんと地震が発生し、地震前の 1/3 サイクル期間で地震が多くなる傾向があるようである。また大地震の再来間隔にもゆらぎが見られる。いずれにしても、これらを系統的にかつ詳細に検討する必要がある。

### 3.2 海底地形を考慮した地震サイクルシミュレーション

図 1 の太平洋プレート境界で発生した 2011 年東北地方太平洋沖地震とフィリピン海プレート境界で発生する次期南海トラフ巨大地震の相互作用を考慮した列島規模の海溝型巨大地震サイクルシミュレーションでは、20 万程度のセル数の東北地方太平洋沖地震サイクルシミュレーション (Ohtani et al., 2014) に対し、100 万のオーダーのセル数を要する大規模計算になる (平原・他, 2013)。

これまでの地震サイクルシミュレーションでは、半無限弾性体を仮定して解析的に解が得られているすべり応答関数を用いていた。2011 年東北地方太平洋沖地震はその破壊が日本海溝に達し、50m を超える地震時すべりが発生した。日本海溝の水深は 7km に達する。また同様に南海トラフ地震も海溝近くまで破壊が達し大きなすべりを生じる可能性がある。南海トラフの水深は 4km である。このように海溝近傍ですべりが地表に達することを考えると海溝の深さに半無限弾性体の地表面を設定することになるが、水深の異なる日本海溝と南海トラフを同時に考えると、これまでの半無限弾性体の考えではうまくいかない。

そこで、任意の地表形状や海底地形を考慮できるすべり応答関数の計算法を開発する必要がある。ところが、任意の形状に対応する解析的なすべり応答関数は存在していない。Hok and Fukuyama (2011) は、全無限弾性体中に断層面とその面に働

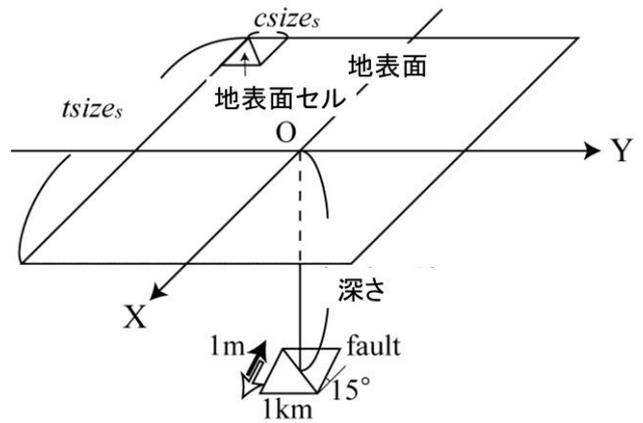


図 4 平坦な地表での逆断層セルによるすべり応答関数計算における、地表セルと地表セル領域 (Ohnati et al., 2013)

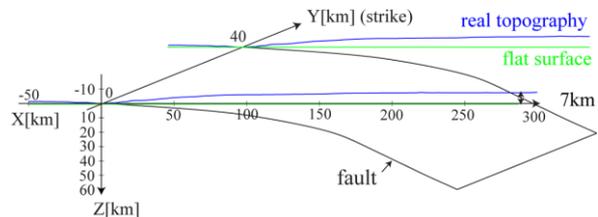


図 5 日本海溝近傍での 2011 年東北地方太平洋沖地震震源域付近での実際の海底地形とプレート境界の 2.5 次元モデル (Ohtani and Hirahara, 2013)

く応力がゼロである自由表面 (地表面) を想定し、自由表面となるように地表面での新たなすべりを求め、それによる断層面での付加的応力変化を加え、全無限弾性体でのすべり応答関数の解析解を用いて、動的破壊伝播問題を解くことに成功した。彼らは、半無限弾性体での動的すべり応答関数の解析的表現を実際の計算で精度よく計算するには大変だったために導入した手法で、地表面は平坦なものしか扱っていないが、任意の形状で計算可能である。Ohtani and Hirahara (2013) は、この手法を用いて任意形状の地表面を持つ半無限弾性媒質中での準動的な地震サイクル計算法を開発した。

図 4 のように、均質無限媒質中にある深さに単位面積 (図では  $1 \times 1 \text{ km}$ ) を持つ逆断層面セル (図では傾斜角  $15^\circ$ ) を、さらに仮想的に自由地表面領域 (サイズ:  $tsize_f$ ) を導入し、サイズ  $csize_f$  のセルに分割する。断層セル  $j$  に単位すべり  $u_j$  を与え

ると地表面セル  $m$  にすべり  $\mathbf{u}_m^s$  が生じ、全無限媒質中でのすべり応答関数  $K^{inf}$  を使って、地表面セル  $k$  での応力  $\tau_k$  を表し、自由境界であるため、ゼロとおくと、

$$\tau_k = K_{kj}^{inf} \mathbf{u}_j + \sum_{m=1}^{Ns} K_{km}^{inf} \mathbf{u}_m^s = 0 \quad (6)$$

から

$$\mathbf{u}_m^s = -[K_{km}^{inf}]^{-1} K_{kj}^{inf} \mathbf{u}_j \quad (7)$$

となり、

$$\begin{cases} \tau_i = K_{ij}^{New} \mathbf{u}_j \\ K_{ij}^{New} = K_{ij}^{inf} - \sum_{m=1}^{Ns} K_{im}^{inf} (K_{km}^{inf})^{-1} K_{kj}^{inf} \end{cases} \quad (8)$$

と書ける。このように、全無限均質弾性体でのすべり応答関数  $K_{ij}^{inf}$  を用いて地表面の影響の入ったすべり応答関数  $K_{ij}^{New}$  を得る。図では地表面は平坦にとっているが、任意形状を扱うことができる。地表面セル領域を大きく、また地表面セルサイズを小さく取ると精度は増していくが、計算量が増加する。Ohtani and Hirahara (2013) は、断層セルの深さおよび傾斜角、サイズを色々変え、解析解のある平坦な地表面の場合と比較しながら、できるだけ地表面セル領域サイズ  $tsize_s$  を抑え、セルサイズ  $csize_s$  を大きくとり、計算精度を保ちかつ計算効率をあげる基準を提出している。式(1)のすべり応答関数にこの式(8)を用いれば、H-matrices 法による省メモリ化・高速化が可能で、地震サイクルシミュレーションのメモリ量や計算負荷は半無限媒質によるものと全く同じである。

図 5 は、日本海溝近傍での 2011 年東北地方太平洋沖地震震源域における、実際の海底地形形状とプレート境界の 2.5 次元モデルを示す。日本海溝は深さ 7km に達する。震源の深さを変えアスペリティを設定して、海底地形の効果を調べたところ、海溝深さ位置を地表にとった平坦半無限媒質モデルと比べると、浅い震源ではすべり応答関数の値が小さくなり、地震の再来間隔が短くなることが分かった。このように、平坦な地表を持つ半無限

弾性体を仮定して得られた、2011 年東北地方太平洋沖地震の摩擦モデルは、海底地形を考慮すると、小さな応力降下と短い再来間隔を与える可能性がある。

### 3.3 アジョイント法による摩擦パラメータ推定

現状では、巨大地震の過去の発生履歴を再現するために試行錯誤的に摩擦パラメータ分布を推定しているが、今後の方向性として、大気海洋で用いられているデータ同化手法を導入して、シミュレーションパラメータの初期値推定も含めて、摩擦パラメータの分布の推定を行い、地震発生予測を目指すことが考えられる。

大気海洋分野で開発されたデータ同化手法の一手法であるアジョイント法（4次元変分法）を用いて、地震後のゆっくりした変動である余効変動データからプレート境界における摩擦パラメータ分布を推定する手法の開発を行い、2003 年十勝沖地震の余効変動実データを例として、プレート境界における余効すべり域の摩擦パラメータ分布の推定を試みた（加納・他, 2013）。

まず摩擦パラメータの推定可能性を検討するために、単純な系を用いた数値実験を行なった。すべり速度と状態に依存する摩擦則と、状態変数の発展則として、スローネス則（Dieterich, 1979）を用いて、モデル変数（すべり速度  $V$  および状態変数  $\theta$ ）の初期値や地震発生域の摩擦パラメータは既知とし、余効すべり域の摩擦パラメータ ( $a, a-b, L$ ) のみを推定した。まず、断層面上のすべり速度を観測データとした場合、観測データが余効すべりの加速過程の情報を含めば、全ての摩擦パラメータが真値から  $\pm 10\%$  の範囲内で求まることが示された。また、地表面における変位を観測データとして同様の実験を行なった場合も結果はほぼ同様で、実際の GPS データを用いた摩擦パラメータが推定可能であることが示された（Kano et al., 2013）。

次に、開発した手法を 2003 年十勝沖地震後の余効すべりに適用した。観測データとして国土地理院により公表されている GPS 解析結果を用いた。

震源域の摩擦パラメータは、シミュレーションにおいて現実的な地震サイクルが得られる値に固定し、すべり速度の初期値は複数の地震サイクルを経て発生した地震直後の値に固定し、初期時刻では定常状態にあるとした。断層面の摩擦パラメータの空間分布を 6 通り仮定し、これらに対して実際の GPS データを同化した。得られた赤池情報量規準 (AIC) の値から最適なモデルを選択し、余効すべり域の摩擦パラメータ分布を推定した。

その結果、本震震源域の東と西とで摩擦特性が有意に異なることや、余効すべり域の摩擦特性が有意に速度強化を示すことが示唆された。また、a-b の値は  $10^{-3}$  程度で先行研究の結果と整合的であり、さらに、新たに L や a の値の推定にも成功した。地震サイクルシミュレーションとデータ同化手法を組み合わせたエポックメイキングな研究と言えるが、求まった解は初期条件に依存することが判明し、初期条件も推定する必要がある。この場合、状態変数  $\theta$  の初期条件の推定に問題が残る (Kano, 2014)。

### 3.4 地殻活動推移予測システム構築に向けて

南海トラフ巨大地震の発生予測に向けて、紀伊半島沖と四国沖に海底ケーブルを用いた、地震津波観測網 (DONET 1 & 2) が海洋研究開発機構により設置されつつあり、陸の GPS (GEONET) 観測網に加え海域のデータが使用できるようになりつつある。こういった今後得られると期待されるリアルタイム地殻変動を、その後の推移予測に向け活用するため、地震発生の数値シミュレーションと地殻変動観測データとを融合した、データ同化手法による地殻活動の推移予測システムを南海トラフで構築しつつある (兵藤・他, 2013)。

このシステムでは、平時の地殻変動に震源近傍のみならず西南日本広域で整合し、かつ、さまざまな地震発生挙動を示すシナリオ群 (一例、図 6) を多数蓄積した上で、DONET 観測に期待される震源近傍での前駆すべりの検出と、その後の推移予測に備える必要がある。このため、現段階で既に有するシナリオ群に対し、まずは、1990 年代後半

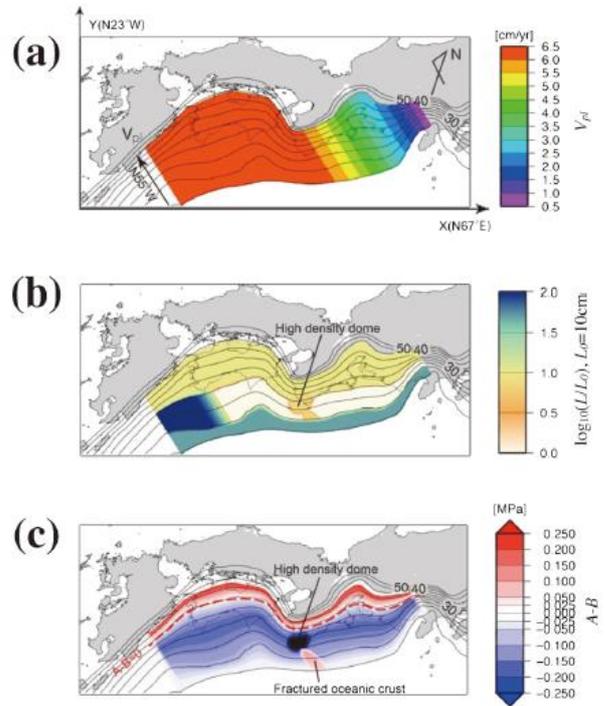


図 6 地殻変動データを説明する南海トラフ巨大地震震源域における摩擦パラメータ分布の一例 (兵藤・他, 2013) プレート収束速度分布 (a)、摩擦パラメータ L (b)、A-B (c) 分布。

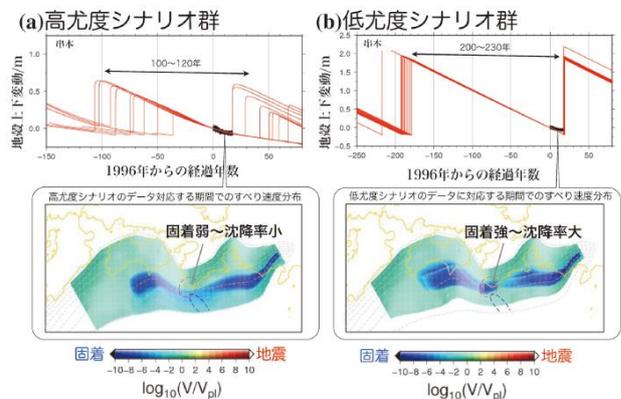


図 7 ある地震サイクルシナリオ群での串本における上下変動時系列 (赤線) に対する観測データ (黒丸) との残差が最も小さくなる地震サイクル中の時期、およびその時期でのプレート境界におけるすべり速度分布の対比。(a) 高尤度シナリオ群、(b) 低尤度シナリオ群の場合。赤線の急激な立ち上がりは地震発生に対応する。(兵藤・他, 2013)

の観測開始以来、20 年近くにわたり日本列島規模でデータを蓄積してきている、GEONET 観測網のデ

ータとの整合性を評価する。次に GEONET データと整合性が高いシナリオを再現する摩擦パラメータ A, B, L の分布をピックアップし、それらに対しばらつきを加えることにより、地殻変動に整合し、かつ、さまざまな地震時挙動を示すシナリオ群を多数蓄積しようとしている（一例、図 7）。

こういったシナリオ群の蓄積に際して、京コンピュータなどの大規模並列計算機を使用すれば、計算機全体に多数の初期値、摩擦パラメータ分布に対するシナリオ計算を割り当てることにより、同時に複数のシナリオを計算することができる。実際、南海トラフ域のプレート境界面（駿河湾～九州沖までの、東西約 1,000 km×南北 300 km の範囲に含まれる深さ 0～40 km の部分）を約 1 km<sup>2</sup> に離散化し、M8 以上の巨大地震を対象としたシナリオ計算を実施する場合、京コンピュータを 24 時間程度専有すれば数百～千程度の初期値、摩擦パラメータに対するシナリオ計算の実行が可能となっている。こうして蓄積したシナリオ群は、シミュレーションデータベースとして、地殻変動データに前駆すべりの発生に対応するような異常が検出された際に、逐次データ同化（SIS: Sequential Importance Sampling）による推移予測に利用されることになる。

### 3.5 不均質弾性・粘弾性モデル

まず、Ichimura et al. (2013) では不規則成層弾性構造モデル用の有限要素モデルの高速作成および解析コードを開発した（図 8）。このコードを用いて、最近の観測データを反映した高詳細な地殻モデルを用いた沈み込み帯の応力・強度分布の推定とそれにもとづく地震発生予測を行うための、粘弾性を考慮可能な高詳細な日本列島広域構造モデルの一次モデルを開発した。構造探査結果を随時取り入れて三次元不均質構造モデルの改良を図ることができる仕様としている。なお、日本列島広域構造モデルを構築するための基礎検討として、西南日本・東北日本における高詳細な地殻モデルを用いた地殻変動解析を行い、その有効性及び列島モデル構築の上で留意点を確認した上で、上記

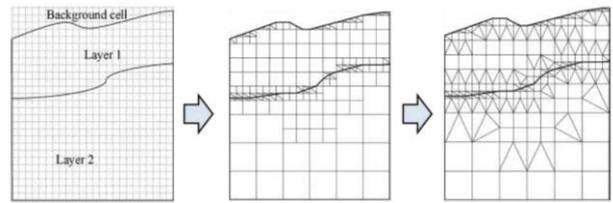


図 8 有限要素モデル作成の概念図 (Ichimura et al., 2013)

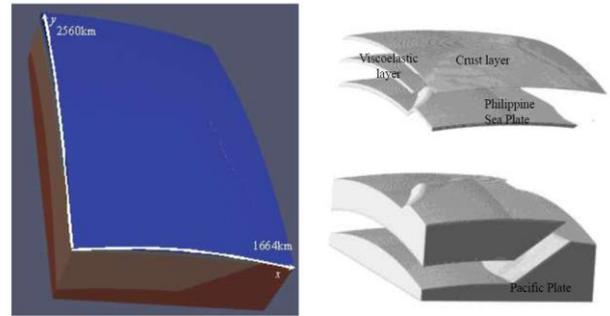


図 9 構築された日本列島広域一次モデルを用いて生成した 3 次元有限要素モデル。左図は g 鳥瞰図、右図は各層の形状。(縣・他, 2013)

のモデル開発を行っている。

このようなモデルとして日本列島全域を含む、東西 1700 km、南北 2600 km、鉛直 400 km の領域に対し高詳細モデルを生成している。地表面形状のモデルとしては日本水路協会発刊の日本近海 30 秒 (900 m) グリッド分解能の水深データ「JTOP030, 2003」を用い、プレート間境界の形状には CAMP スタンダードモデル「C. Hashimoto et al., 2004」を用いた。更に、粘弾性層はユーラシアプレート及び北アメリカプレートの深さ 30 km から 60 km 部分に設定し、他の領域は全て弾性層としている。

狭い領域を対象とする場合、地球の曲率の影響は小さいが、今回のような大領域でモデルを構築する場合には、曲率の影響は大きくなる。元のデータは球殻座標系により定義されているため、これをそのまま直接直交座標系に変換し、モデル生成のための標高データとした。すなわち、直交座標系で、地表面が曲がったモデルが生成されることとなる。図 9 に生成された高詳細な日本列島広域構造一次モデルを用いて生成した三次元有限要

素モデルを示す。地震時地殻変動だけでなく、地震後の余効地殻変動を解析するために構築したモデルである。

### 3.6 H-matrices 法のハイブリッド並列高速化

以前報告したように、MPI を用いた H-matrices 法では 100 コアを超えるあたりから並列化性能が劣化する。そこで、研究代表者も参画している JST CREST プロジェクトにおいて京都大学が独自に開発している H-matrices 法の OpenMP と MPI を用いたハイブリッド分散並列コードを導入し、均質半無限弾性体中での地震発生サイクルシミュレーションを更なる大規模マルチスケールシミュレーションへとバージョンアップする準備をしている。

現状では、まずは H-matrix 計算の部分の並列化が行われたバージョンで、大規模問題が扱えるようにはなっているが、地震サイクル計算の部分のハイブリッド計算コードの開発段階である。

#### (2) 当初計画の達成状況について

これまで手を付けられていなかった、マルチスケール地震サイクルに着手し、複雑な地震発生を扱える状態になった。今後はシミュレーション事例を増やしていける段階に入ったと言える。

当初計画では、早い時期に地震サイクル計算のハイブリッド並列化を行う予定だったが、この部分のチューニングが遅れており、全日本といったような大規模計算ができなかったことが反省点として挙げられる。その代わりに、列島規模地震サイクルシミュレーションでネックとなっていた、日本海溝と南海トラフの深さの問題を解決すべく、海底地形を考慮した地震サイクルシミュレーションコードの開発に成功した。計算負荷は従来の平面半無限媒質中のものより大きくなるが、平面境界を持つ半無限均質弾性媒質の場合での計算と同様に H-matrices 法が適用可能で、今後の  $10^6$  セル以上の離散化セルを持つ列島規模地震サイクル計算への道筋はついたと言える。

また、摩擦パラメータ推定および地殻活動の推移予測へのデータ同化手法の適用については、今

まさに研究の端緒についたばかりである。

余効変動やゆっくりすべり域での実データに基づく、摩擦パラメータを行う準備が整いつつあると言える。

粘弾性不均質構造について、列島規模の大規模有限要素モデルが現実のもととなりつつあると評価できる。

## 4. 今後の展望

上記みてきたように、小さな地震まで含めた階層型マルチスケールアスペリティモデルによる地震発生サイクルシミュレーションを開始したばかりである。絶えず地震が発生し、時間を刻み非常に計算時間がかかっている。現在は時間可変の時間刻みを決めるのに、Numerical Recipes に記載されているアルゴリズムを用いているため、余計な計算をしていることになる。少し試みてはいるが、例えば、すべり速度に応じて一義的に時間刻みを決めるとか、時間刻みを効率よく決定する必要がある。また色々なモデルに対する結果が得られているが、これらの系統的かつ詳細な検討方法を考える必要がある。

列島規模の地震サイクルシミュレーションを考える上で問題となる、海溝の深さの相違の問題を解決する手法を開発した。ただ実際の日本列島規模に適用すると、半無限弾性体でさえ大変な計算が各すべり応答関数の計算で更に負荷がかかる計算になり更なる工夫が必要となろう。

これらの大規模マルチスケール地震サイクルシミュレーションやデータ同化実現の鍵は、H-matrices 法のハイブリッド並列化にあるが、これは別計画で開発されたハイブリッド H-matrices 法を地震サイクル計算に早急に導入して稼働させる必要がある。

更に将来的には、粘弾性や不均質粘弾性構造を視野にいれるべく効率的な有限要素法モデルおよびコード開発も並行して進める必要がある。

## 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)

縣亮一郎, 市村強, 兵藤守, 堀高峰, 平原和朗, 堀宗朗, 震源断層の想定高度化に関する基礎研究-高詳細な三次元地殻構造モデルを用いた地殻変形解析手法の開発-, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 69, I767-I776, 2013.

Hyodo, M. and T. Hori, Re-examination of possible great interplate earthquake scenarios in the Nankai Trough, southwest Japan, based on recent findings and numerical simulations, *Tectonophysics*, 600, 175-186, 2013.

兵藤守・堀高峰・中田令子・宮崎真一・金田義行、地殻変動データの逐次同化にもとづく地震発生予測システムの構築 —南海トラフ巨大地震に向けて—、シミュレーション, 32(4), 295-305, 2013.

Ichimura, T., R. Agata, T. Hori and K. Hirahara, Fast numerical simulation of crustal deformation using a three-dimensional high-fidelity model, *Geophys. J. Int.*, 195, 1730-1744, doi: 10.1093/gji/ggt320, 2013.

Kano, M. S. Miyazaki, K. Ito, and K. Hirahara, An adjoint data assimilation method for optimizing frictional parameters on the afterslip area, *Earth Planet. Space*, 65, 1575-1580, 2013.

Kano, M., Estimation of frictional parameters in afterslip areas by assimilating GPS data: Application to the 2003 Tokachi-oki earthquake, Ph.D thesis, Graduate School of Science, Kyoto University, 2014

Noda, H., M. Nakatani and T. Hori, Large nucleation before large earthquakes is sometimes skipped due to cascade-up -Implications from a rate and state simulation of faults with hierarchical asperities, *J. Geophys. Res.*, 118, 2924-2952, doi: 10.1002 /jgrb.50211, 2013

Ohtani, M., K. Hirahara, T. Hori and M. Hyodo, Observed change in plate coupling close to the

rupture initiation area before the occurrence of the 2011 Tohoku earthquake: implications from an earthquake cycle model, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1899-1906, doi:10.1002/2013GL058751, 2014.

Shikakura, Y., Y. Fukahata, and K. Hirahara, Long-term changes in the Coulomb failure function on inland active faults in southwest Japan due to east-west compression and interplate earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1002/2013JB010156, 2014.

(2) 国際会議プロシーディングス  
なし

(3) 国際会議発表

Agata, R., T. Ichimura, M. Hyodo, K. Hirahara, T. Hori, M. Hori, Inversion analysis method of coseismic slip distribution using three-dimensional high-fidelity model of crustal structure, *APCOM&ISCM*, Singapore, 2013.

Agata, R., T. Ichimura, K. Hirahara, T. Hori, M. Hyodo and M. Hori, Geodetic Inversion analysis method of coseismic slip distribution using a three-dimensional finite element high-fidelity model, *AGU 2013 Fall meeting*, San Francisco, 2013.

Hyodo, M., R. Nakata, K. Ariyoshi, T. Hori, Y. Kaneda,, Current Status of Nankai Earthquake Forecasting System based on Sequential Data Assimilation of the Slip on the Plate Boundary, *AGU 2013 Fall meeting*, San Francisco, 2013.

Nakata, R., M. Hyodo and T. Hori, Possible scenarios for slip history in Hyuga-nada and Bungo channel regions depending on occurrences of Nankai Earthquakes in southwest Japan, based on numerical simulations. *AGU 2013 Fall meeting*, San Francisco, 2013.

Ohtani, M. and K. Hirahara, Effect of the Earth's surface topography on the earthquake cycle, AGU 2013 Fall meeting, San Francisco, 2013.

#### (4) 国内会議発表

縣亮一郎・市村強・兵藤守・堀高峰・平原和朗・堀宗朗、高詳細な三次元地殻構造モデルを用いた地殻変動解析手法の開発とその地震時断層すべり推定への適用可能性の検討、日本地球惑星科学連合 2013 年度連合大会、SSS31-P17, 幕張、2013.

縣亮一郎・市村強・平原和朗・堀高峰・兵藤守・堀宗朗、高詳細三次元地殻モデルを用いた地震時断層すべり分布推定手法の開発とその有効性の基礎的検討、日本地震学会 2013 年度秋季大会、P2-03, 横浜、2013.

平原和朗・大谷真紀子・兵藤守・堀高峰、大規模マルチスケール地震サイクルシミュレーション、日本地球惑星科学連合 2013 年度連合大会、STT59-01, 幕張、2013.

平原和朗・永坂英明・今井敏之、ABAQUS2 次元地震サイクルモデル (1)、日本地震学会 2013 年度秋季大会、P1-44, 横浜、2013.

堀高峰・宮崎真一・兵藤守・中田令子・有吉慶介・金田義行、プレート境界すべりのアンサンブル予測にもとづくプレート境界地震発生予測システム構築の現状、日本地震学会 2013 年度秋季大会、P1-48, 横浜、2013.

兵藤守・中田令子・堀高峰、準動的な地震発生サイクルシミュレーションによる南海トラフ地震発生シナリオの蓄積、日本地震学会 2013 年度秋季大会、P1-47, 横浜、2013.

加納将行・宮崎真一・伊藤耕介・平原和朗、アジョイント法による余効すべり域の摩擦パラメタの推定、日本地球惑星科学連合 2013 年度連合大会、SSS28-P16, 幕張、2013.

加納将行・宮崎真一・平原和朗・石川洋一・日吉善久・伊藤耕介、アジョイント法による 2003 年十勝沖地震余効すべり域の摩擦パラメタの推定、日本測地学会第 120 回講演会、12、立川、2013.

中田令子・兵藤守・堀高峰、東北地方の日本海溝沿いと日向灘における地震発生サイクルに見られる類似した特徴、日本地震学会 2013 年度秋季大会、P1-46, 横浜、2013.

大谷真紀子・平原和朗、地表面形状が地震発生サイクルに与える影響、日本地震学会 2013 年度秋季大会、P1-45, 横浜、2013.

鹿倉洋介・深畑幸俊・平原和朗、近畿地方周辺の内陸地震発生と南海トラフ巨大地震の時空間的關係、日本地球惑星科学連合 2013 年度連合大会、幕張、2013.

#### (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

なし