

11-NA13

## 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）

2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震が発生し、未曾有の東日本大震災を引き起こした。宮城沖では M7 クラスの地震が 30 年程度の間隔で繰り返し発生していたが、その海溝側で 50m に達するすべりを生じ巨大津波を発生させ、幅 200km 長さ 500km にわたる広い領域を破壊し、M9.0 の超巨大地震となった。仙台平野の津波堆積物からこういった超巨大地震は 450-800 年間隔で発生していることが示唆されている。今世紀前半にその発生が危惧されている南海トラフの巨大地震などの巨大地震の発生予測に向けた巨大地震発生サイクルシミュレーションはますます大規模・マルチスケールシミュレーションを必要とするため、昨年に引き続き、階層型行列 (H-matrix) 法によるコードの省メモリ化・高速化を進める予定であった。ところが、この超巨大地震の発生を受け、現在バージョンの H-matrix 法を用いてこの巨大地震発生サイクルモデルの構築のためシミュレーションを緊急に行なった。沈み込む太平洋プレートの 3 次元形状を用い、これまでに提唱されているモデルの中で、階層型アスペリティモデルと強パッチアスペリティモデルを検討した。その結果、宮城沖および茨城沖で M7 クラスの地震が発生する一方、海溝側では固着し続け 800 年程度に一度超巨大地震を発生するという M9 超巨大地震発生サイクルの描像が得られた。

### 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んでいる。これらのプレートの沈み込みにより、およそ百年間隔で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が生じている (図 1)。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、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 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、プレートの沈み込みによって引き起こされる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、東北日本および西南日本の海域での巨大地震発生履歴の再現に成功するなどの成果を上げている。

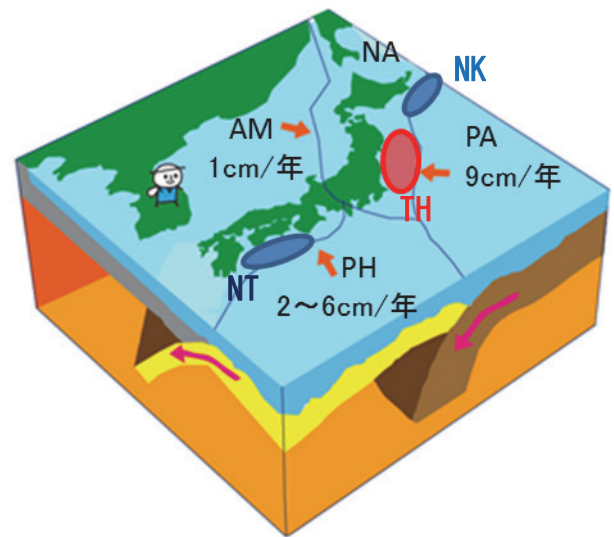


図 1 プレート収束帯としての日本列島

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。  
TH:東北地方太平洋沖地震震源域  
NT:南海トラフ巨大地震震源域  
HK:北海道東岸 500 年間隔地震

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マルチスケールの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。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、より高速化・省メモリ化を実現する地震発生サイクルシミュレーションコードを開発する。

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。そこで、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、3次元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コードを開発する。

上記が申請書に記したもので、今年度も引き続き、地震発生サイクルシミュレーションコードの省メモリ化・高速化を進める予定であった。ところが、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（マグニチュード M9.0）が発生し、未曾有の東日本大震災を引き起こした。こういった数十年から百年に一度のプレート境界地震とは異なる、超巨大地震の発生は、南海トラフや北海道東岸の海溝沿いでその発生が予測されていたが、東北地

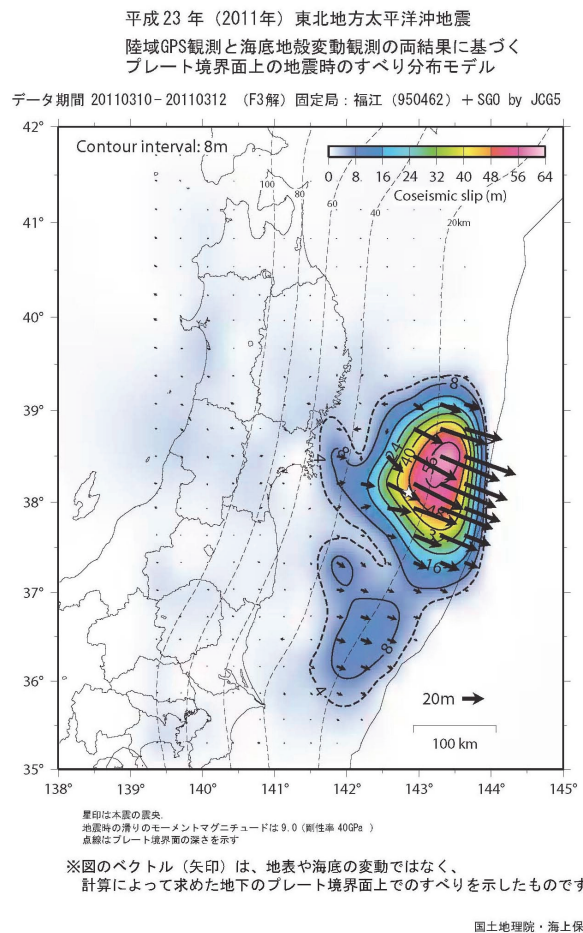


図 2 陸上の GPS 観測による陸上の地殻変動データと GPS/音響測距による海底地殻変動観測データより推定された断層面上でのすべり分布（国土地理院・海上保安庁, 2011, <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110520-index.html>）

方宮城沖では M7~8 クラスの巨大地震のみが想定されて、想定外と言える状況にあった。この超巨大地震の発生過程を解明する必要があり、予定を変更して緊急に超大地震サイクルシミュレーションを行っている。こういった超巨大地震サイクルの発生機構の解明は今後の南海トラフ巨大地震の予測に向けても非常に重要な課題と捉え、研究を進めている。

宮城沖では M7 クラスの地震が 30 年程度の間隔で繰り返し発生していたが、その海溝側で 50m に達するすべりを生じ巨大津波を発生させ（図 2）、450x200km の領域を破壊し、M9.0 の超巨大地震と

なった。仙台平野の津波堆積物からこういった超巨大地震は 450-800 年間隔で発生していることが示唆されている。50m を超える巨大なすべりを発生した領域は、プレート収束速度 (約 9cm/年) を考えると 500 年以上にわたりびったり固着していたことになる。福島沖では、また、福島沖では 2000 年頃までは固着していたが、2005 年頃からは地震時すべりより余効すべりの方が大きい地震が発生し、また海底 GPS 観測からも固着のはがれが進行していたことが知られていた。これらの特徴を説明する地震サイクルモデルを構築する必要がある

## 2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

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。

## 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

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) に区切ると、各セル  $i$  での準静的運動方程式は次のように書ける。

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

ここで、 $\tau_i$ ,  $V_i$ ,  $\delta_j$ ,  $V_{pl,j}$ ,  $K_{ij}$ ,  $G$ ,  $\beta$  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)

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

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

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(4)と連立させて、時間刻み幅可変の 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と状態変数 (その時間発展は式(3)に従う) との関数となっており、 $\sigma$  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、 $a$  および  $b$  (または  $A = \sigma a$  および  $B = \sigma b$ ) 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 ( $a-b$  または  $A-B$ ) が正 (負) だと速度強化 (速度弱化) を示し、すべり速度が増すと摩擦が増える (減少する)。また、 $L$  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  $h$  が、

$$h < h^* = cGL/\sigma(b \cdot a) \quad (4)$$

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

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

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、 $O(N^2)$  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・高速化を開発中である(平原・他, 2011a; Ohtani et al., 2011a)。開発中の H-matrices 法を用いてシミュレーションを行なった(大谷・他, 2011; Ohtani et al., 2011b, Ohtani, 2012)。

### 3-1 モデル

3次元形状を持つプレート境界を 200,704 個の三角形のセル(小断層)に分割する ( $N=200,7004$ )。図 3 にすべり応答関数行列の H-matrices を示す。なお、プレート収束速度  $V_{pl}$  は 8.4cm/年に設定している。また、摩擦分布モデルとしては、階層アスペリティ (HA) モデルと通常のアスペリティ (SA) モデルを考え、比較した。

Hori and Miyazaki (2011) を参考に HA モデル、および Kato and Yoshida (2011) を参考に通常の SA モデルを構築した (図 4)。彼らのモデルは概念モデルや 2次元モデルであったが、本研究では実際の 3次元プレート形状に基づく大規模シミュレーションを実行した。

A-B<0 の領域では速度弱化を生じると述べたが、これは領域サイズが  $L/(B-A)$  に比例する臨界サイズ  $L_c$  より小さい時に生じ、固着—すべりを繰り返す。こういった領域をアスペリティと呼んでいる。

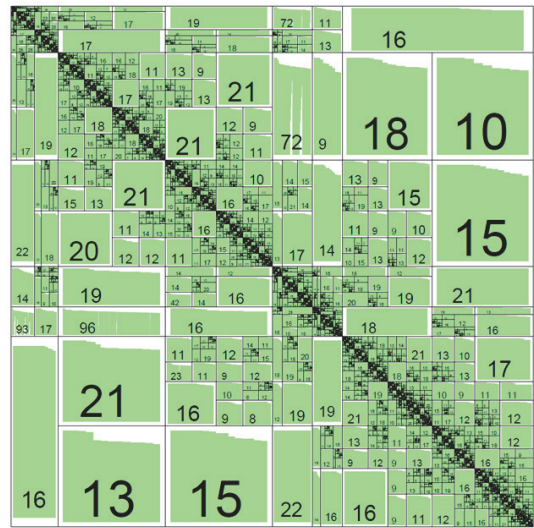


図 3 すべり応答関数の H-matrix 表示。もとの行列サイズは ( $N^2$ 、 $N=200,7004$ )。小行列内の数字は近似するランク数を表す。

領域サイズが大きくなって、臨界サイズと同程度か大きい A-B<0 の領域は条件付き不安定すべりといった摩擦特性を持ち、余効すべりと地震すべりを起こすことができる。

階層アスペリティ (HA) モデルは、M9 の震源域全域のサイズが臨界サイズと同程度になるように A-B<0 及び大きな L を設定している。その中で今回 50m 以上のすべり生じた宮城沖浅部の領域で B-A を大きくして地震時応力降下量を大きくし、地震の繰り返し間隔が 500 年以上になり、大きなすべりが生じるように設定している。さらに数十年の繰り返し間隔を持つ宮城沖深部、茨城沖で L

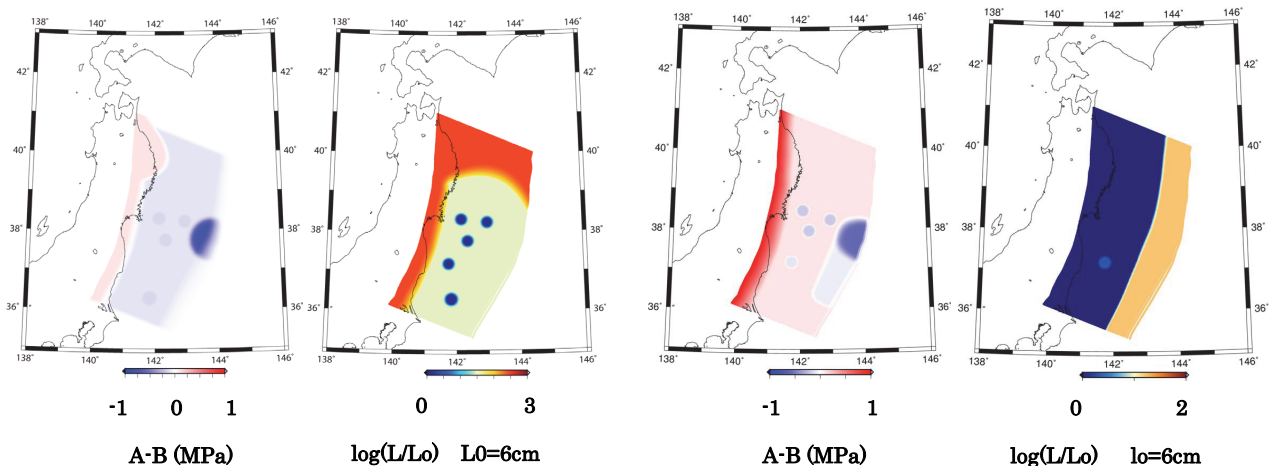


図 4 HA (左) と SA (右) モデルにおける A-B および L の分布

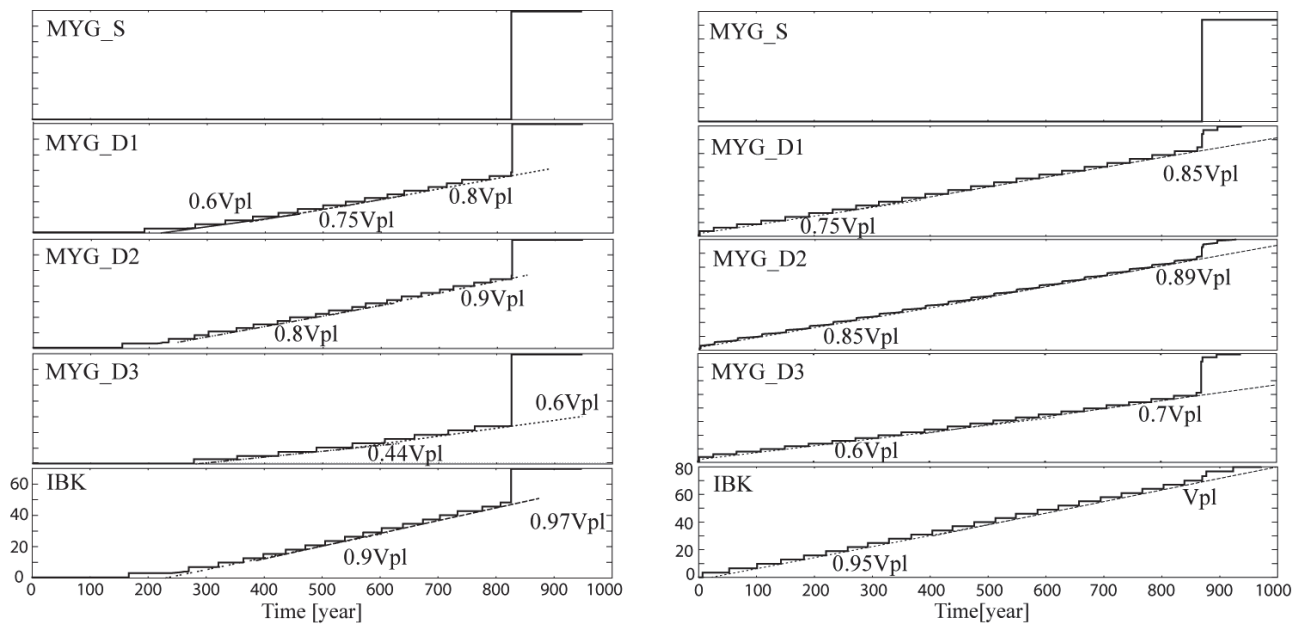


図5 階層アスペリティ (HA) モデル (左) と通常のアスペリティ (SA) モデル (右) の場合の各領域におけるすべり蓄積の巨大地震サイクル中での時間変化。  
宮城県沖浅部 (MYG\_S)、宮城県沖深部(MYG\_D1,D",D3)、茨城県沖 (IBK)  
Vpl:太平洋プレート収束速度

を小さくして臨界サイズより小さなアスペリティを置いている。福島沖深部は繰り返し間隔が明らかでないがアスペリティを設定している。これに対し、強パッチを持つ通常の SA モデルでは、Lは浅部で大きく深部で小さいといった深さ依存で設定し、 $A-B>0$  の速度強化領域に、絶対値の大きな  $A-B<0$  の値を持つ強パッチを宮城県沖浅部のすべりの大きかった領域に設定し、宮城県沖深部、福島沖深部のアスペリティの設定は HA モデルと同じ考えで設定しているが、茨城県沖のアスペリティはまだ設定していない。ただ、福島沖浅部では地震時前のゆっくりすべりと固着を再現するようやや  $B-A<0$  に設定している。

### 3-2 シミュレーション結果

図5に各領域における積算すべり量の超巨大地震サイクル内の時間変化を示す。このパラメータ設定では、HA モデルと SA モデルでは、それぞれ巨大地震の繰り返し間隔は、825 年、853 年で、地震時の最大すべり量は、67.8m、72.7m となってい

る。

HA モデルでは、地震後での余効すべりが終わると以降は M9 震源域全域にわたり強く固着するが、深部から剥がれていき、アスペリティ部分に応力がかかるようになると、そいて茨城県沖 (IBK) や宮城県沖深部のアスペリティ (MYG\_D1, D2, D3) では地震が発生するようになる。宮城県沖深部や茨城県沖では地震は発生するが、蓄積したすべりを全て解放する訳ではなく、MYG\_D3 ではサイスミックカップリングは 0.44 となり、従来言われてきた 0.3 に近く、観測が再現されている。実際にも 2 日前に前震が発生し、その地震時および余効すべりが本震をトリガーしたと言われているが、シミュレーションでも MYG\_D1 の地震後余効すべりで巨大地震はトリガーされ、62 日後に発生している。

SA モデルでは、巨大地震後深部の  $A-B>0$  領域では余効すべりが発生し、そのため宮城県沖深部 (MYG\_D2 や\_D3) では地震活動が促進されている。モデルパラメータ設定によりこの特徴を薄めることは可能であるが、これは HA モデルと大きく異なる特徴である。

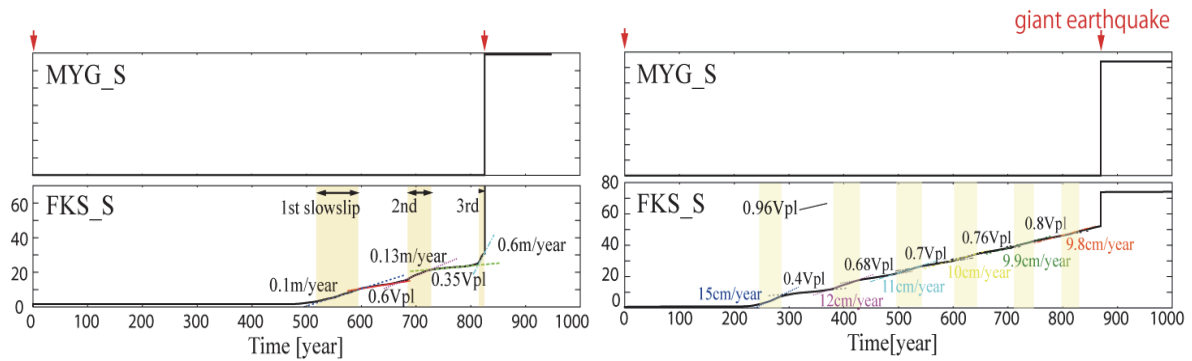


図 6 宮城県沖と福島県沖浅部 (MYG\_S と FUKS\_S) における積算すべり量のサイクル中での時間発展の比較。

陸域 GPS 観測から 2000 年までは福島県沖に強い固着域が観測されていたが、2007 年以降本震前までこの固着が弱くなり、また 2005 年以降に発生したこの地域の地震の余効すべりが本震のモーメントを上回るといった現象が生じていた。このように震源域におけるプレート間固着の剥がれ (弱まり) は M9 超巨大地震の準備過程を表すとも考えられる。

HA モデルでは M9 震源域全体にすべり速度弱化ではあるが条件付き安定すべり特性を与えている、そこで福島県沖浅部 (FKS\_S) では、図 6 左図に示すように、地震サイクル前半では固着しているが、深部からの剥がれが浅部へ達するサイクル後半に入ると、ゆっくりすべり一固着をくりかえすようになる。こういったゆっくりすべりの部分が 2000 年後半のプレートの剥がれに対応している可能性がある。SA モデルでも福島県沖浅部に条件付き安定すべり特性を与えると、図 6 右図に見られるように、ゆっくりすべり一固着を繰り返す。

このように、本震前の福島県沖での固着の弱まりは本震破壊の準備過程ではなく、やはり本震は宮城県沖深部 (MYG\_D1) での地震発生およびその余効すべりによりトリガーされた可能性が高い。

なお、宮城県沖浅部での特大すべり域を生成するメカニズムには、ここで考えた強い固着を持つ強パッチを設定する代わりに、高速すべり域で摩擦力が急減しかつ大きな L を持つ新たな摩擦構成則 (Shibazaki et al., 2011) や、摩擦係数の変

化に加えて、地震時すべりによる摩擦発熱のため、断層間隙に含まれる流体が熱せられ間隙流体圧が上昇し (TP: Thermal Pressurization)、有効法線応力、すなわち摩擦力が急減し、特大すべりや大きな応力降下をもたらしたとする考えが出されている (Mitsui et al., 2012)。こういったモデルにおいても、強パッチ以外の M9 震源域の振る舞いはここで述べた 2 つのモデルの振る舞いによくできると思われる。

## (2) 当初計画の達成状況について

2011 年東北地方太平洋沖地震の発生を受け、急遽その発生要因を探るべく、現在開発中の階層型行列 (H-matrices) 法を用いて、大規模 M9 超巨大地震サイクルシミュレーションを緊急に実施した。概念的あるいは 2 次元モデルで提唱されていた 2 つのモデルについて、沈み込む太平洋プレートの 3 次元形状を考慮して、実際的なシミュレーションを実行し、M9 超巨大地震発生の 2 つのシナリオをえることができた。

2 つのモデルの違いは、地震後に現れる。すなわち HA モデルでは、M9 震源域で固着が進み、地震サイクルの前半中は、M7 地震の発生が抑えられる。これに対し、SA モデルでは、M9 震源域内のアスペリティ以外の領域では、安定すべり特性を与えているので、地震後には余効すべりと安定すべりにより M7 震源域に応力が掛かり、M7 地震の発生が早まりまた発生間隔も短い。やがて余効すべ

りも落ち着き数錠年間隔で M7 クラスの地震が発生するようになる。このように、M7 地震の活動が大きく違ってくるので、今後の観測が重要となる。

このように、ある程度のモデルを示せたと言え、M9 超巨大地震の発生を受け急遽変更された当初の目的は達成されたと言える。

#### 4. 今後の展望

階層型行列 (H-matrices) 法を用いた地震発生サイクルシミュレーションで、並列化性能に問題があることが分かっており、その改善に向けて方策を取る必要がある。

2011 年東北地方太平洋沖地震については、まずは現行の 2 つのモデルの詳細を更に調べてより定量的に色々な観測量と照らし合わせて、超巨大地震サイクルモデルを構築し、今後の房総沖での地震発生可能性を検討する必要がある。

更にモデルスペースを抑えるために今回破壊しなかった岩手北・青森沖のアスペリティについてはモデルに入れていない。H-matrices 法の並列化効率の更なる向上を図り更なる大規模シミュレーションに挑む必要がある。

またここでは弾性媒質での準動的シミュレーションを考えているが、最初に述べたように海溝型地震と内陸地震との相互作用を考える際に必要となることに加えて、500-1000 年と言った長い繰り返し間隔を持つ超巨大地震サイクルシミュレーションにはマンタルの粘弾性を考慮する必要がある。粘弾性媒質における応力計算には粘弾性すべり応答関数とすべり速度の履歴積分 (畳み込み積分) が必要である。そのため、過去の全てのすべり速度履歴をメモリにおく必要があり大変な計算になる (FFT を用いた計算も同様)。非弾性媒質中を伝播する地震波の減衰を差分法を用いて時間領域で計算するのに開発された、メモリ変数を用いた有効な計算手法を開発中である (平原・他、2011b ; Hirahara et al., 2011b)。この方法では、粘弾性すべり応答関数を数個の緩和関数で近似し、各緩和関数に対応する 1 階の常微分方程式に従うメモリ変数を導入して、履歴積分を行わず応力計算が

可能となる。現状では、粘弾性体中のすべり応答関数の計算およびメモリ変数を用いる際に階層型行列法を用いて単純に高速化できないという難点がありクリアすべき問題があるが、なんとか解決して粘弾性計算に進む必要がある。

しかしながら、階層型行列 (H-matrices) 法を用いた地震サイクル計算の省メモリ化・高速化における並列化性能を含む、これらの難点を克服し、内陸断層とプレート境界地震とがカップルする地震発生サイクルシミュレーションへと研究を進める必要がある。

#### 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)  
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」 *Procedia Computer Science*, 4, 1456-1465, 2011a.

Hori, T. and S. Miyazaki, 「A possible mechanism of M 9 earthquake generation cycles in the area of repeating M 7 ~ 8 earthquakes surrounded by aseismic sliding」, *Earth Planets Space*, 63, 773,777, 2011.

Mitsui, Y., N. Kato, Y. Fukahata and K. Hirahara  
Megaquake cycle at the Tohoku subduction zone with thermal fluid pressurization near the surface, *Earth Planet Sci. Lett.*, 325-326, 21-26 doi:10.1016/j.epsl.2012.01.026, 2012.

(2) 国際会議プロシーディングス  
なし。

(2) 国際会議発表

Hirahara, K., M. Ohtani, M. Hyodo, T. Hori. [Fast computational methods for large- and multiscale interplate earthquake cycle simulations,] IUGG2011, S10S2-3078, Melbourne, 2011.

Hirahara, K., M. Ohtani, Y. Shikakura,  
[Quasi-dynamic earthquake cycle simulation in a  
viscoelastic medium with memory variables,] AGU  
2011 Fall Meeting, T43I-01, San Francisco, 2011.  
Ohtani M., K., Hirahara, T., Hori, and M., Hyodo,  
「Comparative study on quasi-dynamic earthquake  
cycle models」 for the 2011 giant Tohoku Earthquake,  
AGU 2011Fall Meeting, U51B-0044, San Francisco,  
2011.

#### (4) 国内会議発表

鹿倉洋介・深畑幸俊・平原和朗、「南海トラフ沈み  
込みイベントに伴う西南日本内陸活断層の破壊  
関数変化」、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、  
SSS035-P01, 幕張、2011a.

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発生サイクルシミュレーシ  
ョンの高速化手法」、日本地球惑星科学連合 2011  
年大会、SSS035-40, 幕張、2011a.

堀高峰・兵藤守・宮崎真一、「東南海地震後から南  
海地震までの地殻変動データに対する逐次デー  
タ同化の数値実験」日本地球惑星科学連合 2011  
年大会、SSS035-39, 幕張、2011

鹿倉洋介・深畑幸俊・平原和朗、「フィリピン海プ  
レートと太平洋プレートの沈み込みイベントに  
伴う西南日本内陸活断層のクーロン破壊関数の  
変化」、日本地震学会 2011 年秋季大会、P3-45  
静岡、2011b

平原和朗・大谷真紀子・鹿倉洋介、「メモリ変数を  
用いた粘弾性媒質における地震発生サイクルシ  
ミュレーション」、日本地震学会 2011 年秋季大  
会、D21-10, 静岡、2011b.

大谷真紀子・平原和朗・堀高峰・兵藤守、「2011 年  
東北地方太平洋沖地震発生サイクルモデルの準  
動的シミュレーションによる比較検証」、日本地  
震学会 2011 年秋季大会、P1-13, 静岡、2011.

兵藤 守・堀 高峰、「東北地方太平洋沖地震に伴  
う海溝軸付近での地殻変動の解釈」日本地震学  
会 2011 年秋季大会、P2-12, 静岡、2011.

#### (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。