

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

プレート境界地震のための地殻活動予測シミュレーション・データ同化システムの構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

(2-1) 地震発生予測システム

ア．地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

(2-1) 地震発生予測システム

イ．地殻活動予測シミュレーションの高度化

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

本課題では、第 2 次計画までに開発された地殻活動予測シミュレーションモデルを更に改良し発展させるとともに、地震活動、地殻変動等の観測データの情報をシミュレーションに取り入れるためのデータ同化システムのプロトタイプを開発し、プレート境界地震の発生履歴の再現やプレート境界の摩擦特性の推定等を行う。さらに、これらのシステム及びモニタリングシステムを構成要素とする地震発生予測システムの全体像を設計し、プロトタイプシステムを実際のデータに適用してプレート境界における滑りの時空間発展や地震発生を予測するデータ同化・予測実験を行う。こうした研究を通して本格的な地震発生予測システムの構築に向けて準備を整える。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

(a) 地殻活動予測シミュレーションモデルの開発研究及び予測実験

日本列島全域を対象とした地震発生シミュレーションの為に数値計算コードの改良と最適化を行なう。また、プレート境界面の摩擦特性の推定に向けた地殻変動解析モデルの構築を進める。

また、沈み込むプレートの 3 次元形状を考慮し、規模依存の破壊エネルギー・摩擦特性分布を用いた、半無限均質弾性媒質中における南海トラフ及び千島海溝巨大地震発生サイクルシミュレーションを行い、歴史地震に見られる、大きな発生間隔・規模・東西セグメントの破壊時間差を再現するモデル作成を行うとともに、シミュレーションコードの高速化を進める。さらに、滑り応答関数計算を高度化するため、GeoFEM コードを改良して均質粘弾性媒質モデル作成の効率化を図る。

一方、これまでのシミュレーションであまり考慮されていなかった。；応力や摩擦パラメータ等の短波長不均一が地震サイクルや予測に及ぼす影響をシミュレーションにより調べる。

さらに、プレート境界と内陸地震の相互作用の理解と活動度予測のための、計算効率の高い不連続体セルモデルシミュレーションモデル構築において、成層粘弾性媒質中での滑り応答関数を用いた粘弾性地震発生サイクルシミュレーションに取り掛かる。

平成 21 年度は、南海トラフ、日本海溝、千島海溝等のプレート境界を対象に、シミュレーションモデルを作成する。フォワード計算により、応力相互作用の評価を行う。

平成 22 年度は、不均質粘弾性構造、動的破壊過程、プレート境界地震と内陸地震の相互作用等を考慮して、モデルの高度化を進める。相互作用評価を継続する。

平成 23 年度は、モデル高度化を継続する。過去の大地震発生系列を再現するシミュレーションにより、摩擦特性等を推定する。近年の大地震の破壊過程、余効滑り過程のシミュレーションにより、摩擦特性等を推定する。

平成 24 年度は、シミュレーションによる摩擦特性等の推定の継続。プレート境界と内陸の相互作用のシミュレーション。摩擦パラメータ推定の不確定性が予測精度に及ぼす影響の評価を行う。

平成 25 年度は、これまでに推定された摩擦パラメータ等に基づき、予測シミュレーションを試行する。予測シミュレーションの誤差を評価する。シミュレーションに基づき、西南日本内陸の地震活動の変化について議論する。

(b) 地殻変動データを用いたデータ同化手法の開発と同化実験

プレート境界地震の余効滑りなどゆっくりとした断層運動を対象として、GPS データなど地殻変動データから、速度・状態依存摩擦構成則で用いられる摩擦パラメータや、滑り速度等の初期値を推定する手法を開発する。単純なバネ・ブロックモデルや複数のセルモデルを用いた研究を進めるとともに、2次元の連続体モデル（1次元断層）による解析手法について検討する。

平成 21 年度は、地殻活動予測システムの全体設計、パラメータ最適化手法、逐次データ同化手法の検討を行う。

平成 22 年度は、地殻活動予測システムの全体設計を完了し、パラメータ最適化手法、逐次データ同化手法の開発、試験を行う。

平成 23 年度は、データ同化の解析事例を増やし、手法の高度化を行う。

平成 24 年度は、予測シミュレーションと連携したデータ同化実験のためのシステム開発を行う。

平成 25 年度は、予測シミュレーションとデータ同化システムを連携させた予測システムのプロトタイプを稼働させる。

(c) 地震活動データの活用手法の開発

繰り返し地震をもれなく抽出し、滑り量分布の推定の精度を上げるため、幅広い規模の地震に適用できる新たな繰り返し地震抽出基準の策定を行う。具体的には、釜石沖等のすでに知られていて、現在の波形相似性の基準では抽出されない中規模繰り返し地震を用い、波形の相似性からこれらの繰り返し地震を同定できる基準を調べる（解析周波数帯、ウィンドウ等の工夫）。次に、この基準を用い、過去の波形記録を系統的に探索する。

関東地方及び東海・東南海地域の微小地震活動度の長期的変化を高信頼度で推定する。そのためには、時間的・空間的に均質な地震カタログを作成する必要がある。東京大学地震研究所の微小地震観測網で 1994 年から 2007 年までに観測された M3 以上の地震の震源と M の再決定を実施する。その際、使用する観測点は 1994 年当時の配置に固定し、新しい観測点を導入したことによる影響を除去する。

（北大・地震研）

測地データに加えて小繰り返し地震のデータを用いて、余効滑りの時間発展を推定する手法を確立する。特に、異種データの重み付けや滑りの空間分布に対する penalty 項の与え方について種々検討を行い、最適なものを見いだす。

平成 21 年度は、波形の相関、詳細な震源決定や、発生間隔等をもとに、小繰り返し地震を抽出する最適な手法の開発を開発する。また、地震活動から応力変化を推定する手法を開発する。

平成 22 年度は、小繰り返し地震と GPS データを用いてプレート間滑りの推定を行う手法を開発する。また、地震活動データから応力変化の推定を試み、その有効性を検証する。

平成 23 年度は、開発した手法を用いて、プレート境界の滑りの時空間発展を推定する。また、推定された応力変化がプレート境界の滑りによるものと仮定して、滑りの時空間発展について知見を得る。

平成 24 年度は、地震活動データから推定された滑り変化と数値シミュレーションを比較することにより、プレート境界の摩擦特性、応力について知見を得る。

平成 25 年度は、地震活動データを用いたデータ同化手法について検討する。

(7) 計画期間中(平成 21 年度~25 年度)の成果の概要:

本研究では、プレート境界地震を対象に、地震発生予測システムの構築へ向けて必要となる地殻活動予測シミュレーションおよびデータ同化システムの開発の研究を進めて来た。5 年間の実施内容および主たる成果を以下にまとめる。

(a) 地殻活動予測シミュレーションモデルの開発研究および予測実験

・準静的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(京都大学)

地震発生サイクルシミュレーションでは、プレート境界を N 個のセルに分割し、各セルでの運動方程式と摩擦則をカップルさせて、滑りの発展を追いかける。この際応力計算において、滑り応答関数行列と滑り(速度)ベクトル積を計算する必要があるが、その計算量および計算に必要なメモリ量は $O(N^2)$ である。南海トラフなどの大領域における地震発生サイクルシミュレーションでは N が大きく、計算時間および使用メモリの大きな大規模計算になる。また摩擦パラメタの推定(データ同化)等には、摩擦構成則の強い非線形性の故、多くの繰り返し計算を必要とする。こういったことから、地震発生サイクルシミュレーション計算の省メモリ化・高速化が必須である。

これまでの高速化の手法として FFT を用いたものが挙げられるが、空間的対称性を仮定した周期的境界条件を用いていて、適応範囲が限られている。そこで、当初、天体物理学における N 体長距離相互作用の高速計算用に開発された高速多重極法(FMM)を用いて、無限均質弾性媒質中での滑り応答関数行列と滑り(速度)ベクトル積の計算の高速化の検討を行ない、 $O(N)$ の計算時間およびメモリ量で計算でき、高速化が可能であることを示した。ところが、半無限均質弾性媒質の滑り応答関数ではうまく多重極展開ができず、問題があることが分かった。そこで、マックスプランク研究所で開発された、階層型行列(Hierarchical Matrices, H-matrices)法を用いた省メモリ化・高速化を検討したところ、メモリ量は $O(N)$ 、計算量は $O(N \sim N \log N)$ と省メモリ化・高速化を達成できることが分かり、大規模計算が京等のスパコンのみならず大学の大型計算機でも可能になった(Ohtani et al., 2011)。

H-matrices 法を具体的に適用した例として、階層型アスペリティモデルに基づく、2011 年東北地方太平洋沖地震サイクルシミュレーション($N = 200,704$)(Ohtani et al., 2014)、および 1986 年十勝地震震源域を含む北部領域まで震源域を広げ($N=237,204$)にして、大規模シミュレーションを実行した。さらに N が $O(10^6)$ 以上となる列島規模および色々なサイズの地震を含む、大規模マルチスケール地震サイクルシミュレーションの必要性を検討した。

・起伏を持つ地表面形状が地震発生サイクルに与える影響(京都大学)

H24 年度の研究で、北海道東岸 500 年間隔地震、2011 年東北地方太平洋沖地震および南海トラフ巨大地震といった巨大地震の相互作用を含む列島規模の地震サイクルモデルの必要性を論じ、H-matrices 法を適応すれば、計算に要するメモリ量や計算時間に関してはクリアでき実現可能であることを示した。ところが、現状の半無限均質弾性媒質を仮定して滑り応答関数を計算する手法では、プレートが地表に達する日本海溝と南海トラフの深さがそれぞれ約 7km と 4km といった違いがあるため、扱いが難しくなる。そこで、平成 25 年度に、平面ではなく海溝など地表面が起伏を持つ場合の地震サイクル計算法を開発した。

Hok and Fukuyama (2011) は、半無限均質弾性媒質中での動的滑り応答関数が複雑で計算に問題があるため、全無限均質弾性媒質中に断層面と自由表面境界を設定し、断層滑りによる応力と自由表面境界に生じる変位による応力が自由表面境界条件を満たすように境界での変位を計算することで、全無限均質弾性媒質中での滑り応答関数を用いて、半無限均質弾性体中での滑り応答関数を計算する手法を開発し、動的破壊シミュレーションを行なった。彼らは平面地表面を扱っていたが、起伏を持つ任意形状の地

表面を扱うことができる。これを静的滑り応答関数計算に応用し、全無限均質弾性媒質中での滑り応答関数を用いて、任意形状を持つ地表面を持つ半無限媒質での滑り応答関数計算法を開発した。その際、任意形状を持つ地表面を小セルに分割して変位を求める必要があるが、計算する地表面領域を広く、また分割セルサイズを小さく取るほど、計算精度は上がるが、計算コストも上昇する。そこで、大谷・平原 (2013) は、地表が平面境界の場合の解析的滑り応答関数と参照して、断層セルの深さ・傾斜角に応じて、精度を保つために必要な地表面領域の広さ、および分割セルサイズを見出し、計算コストを抑える手法を開発した。任意形状の地表面形状をもつ弾性媒質での滑り応答関数が計算できれば、H-matrices 法は適用可能であり、滑り応答関数と滑り遅れベクトルの積は $O(N \sim N \log N)$ で計算可能である。図 1 に例として計算した、日本海溝に沈み込む太平洋プレート境界での地震サイクル計算に用いた形状を示す。日本海溝の水深 7km を $Z=0\text{km}$ にとっているが、海底地形 (図 1 の青線) は日本列島に近づくにつれ上昇している ($Z=-7\text{km}$)。この状況で、深さ 13km、33km におよそ 40km のサイズのアスペリティを置き、地震サイクル計算を行なったところ、全無限の場合の地震間隔、海溝の深さに平面境界をおいた場合、および図 1 の海底地形表面 (青線) を持つ半無限弾性媒質の場合の地震間隔を $T^{inf}, T^{flat}, T^{real}$ とすると、それぞれのアスペリティの深さで $(T^{real}-T^{inf})/(T^{flat}-T^{inf})=0.54$ および 0.62 となつて、海溝の深さに設定した平面半無限弾性体に比べ、海底地形を持つ場合の地震間隔は長くなる。これは断層面と地表との距離が滑り応答関数に影響し、その結果地震間隔が変わることになる。

・粘弾性媒質中での地震発生サイクルシミュレーション (京都大学)

粘弾性媒質中での応力計算には、滑り応答関数と滑り遅れ速度の履歴積分を必要とし、メモリおよび計算量とも弾性媒質より大変な計算になる。当初、メモリ変数を用いて、履歴積分を要しない新手法を開発し (平原・他, 2011)、弾性媒質と同様に粘弾性媒質でもメモリ変数を用いた滑り応答関数に H-matrices 法が適用でき実際の計算が可能になると報告したが、残念ながら、H-matrix 法は適用できず、セル数を N とすると、従来の方法による弾性計算とほぼ同じ $O(N^2)$ の計算量が必要となることが分かった (平原・他, 2012)。ただし履歴積分では $O(N^3)$ の計算が必要となるので、省メモリ化・高速化は実現されてはいることになり、H-matrices 法を用いない弾性計算と同程度の高速化は図られている。今後は更に、履歴積分に H-matrices 法を適用して、省メモリ化・高速化を図る工夫が必要である。

・南海トラフ巨大地震サイクル中における西南日本内陸地震活動 (京都大学)

粘弾性媒質中の地震サイクル計算ではないが、南海トラフ巨大地震サイクル中における西南日本内陸地震活動を予測するクーロン破壊応力 (CFF) の時間変動シミュレーションを行なった。南海トラフ巨大地震の発生前 50 年から後 10 年に西南日本で内陸地震活動が増す (Utsu, 1974; Hori & Oike, 1996) と報告されている。これを受けて、東西圧縮、南海トラフでの固着と地震発生に伴う粘弾性応答による CFF、および変形源として内陸地震発生を加え、近畿地方周辺の多数の活断層上での CFF を計算した結果、南海トラフ巨大地震の発生前に逆断層型地震が多く起こり、発生後に横ずれ型地震が多くなることを予測する結果 (図 2 右図) を得た (Shikakura et al., 2013)。実際、多くの逆断層タイプの地震は南海トラフ巨大地震前に発生していることを確認した (図 3)。

・単純化モデルによる地震サイクルの定量的理解 (東京大学)

現実的なシミュレーションを行い、モデルとデータに基づき地震発生の予測を目指すためには、プレート境界面にはたらく摩擦について適切な構成則を用いるとともに、現実的なパラメタを知る必要がある。プレート境界地震の破壊開始点付近の破壊エネルギーを推定するなど、プレート境界の摩擦特性について定量的な理解を進めた。また、破壊エネルギーや応力降下量の規模依存性について考察を行った。プレート境界面上の摩擦特性の空間的不均一性に関しては、2011 年東北地方太平洋沖地震を含む地震サイクルのシミュレーションなどにより理解を進めた。地震の長期的な予測のためには地震発生の不規則性や非周期的な振る舞いを理解する必要がある。単純な 2 自由度バネ-ブロックモデルを用いたシミュレーションにより摩擦パラメタの変化により周期的な地震発生から非周期的な地震発生に遷移する過程を調べた。また、単一のアスペリティからなる系でも滑りイベントの発生にカオス的な振る舞いが見られる場合があることが明らかになった。

平成 25 年度は、ほぼ同じ場所で繰り返し発生する地震について、規模や発生間隔の規則性を理解

することを目的とした検討を行った。ほとんど同じ規模の地震が同じ場所で繰り返す場合も、繰り返し間隔は必ずしも一定にはならない。この原因として、別のアスペリティとの相互作用の効果を含む、応力のゆらぎが考えられる。ここでは、他のアスペリティとの相互作用がない孤立したアスペリティに一定速度でせん断応力をかけたときの地震サイクルのシミュレーションを行い、繰り返す地震の規模や発生間隔のゆらぎを調べた。平面断層上に速度・状態依存摩擦則に従う摩擦がはたらいっていると、円形領域内では速度弱化的摩擦特性で（アスペリティ）、その外側では速度強化的摩擦特性を仮定する。アスペリティでは繰り返しエピソードな滑りが、周囲では安定滑りが発生する。特徴的滑り量 L を変えてシミュレーションを行い得られたモーメント解放率の時間変化を図 4 に示す。周期的に地震が発生する場合もあるが、倍周期的な滑りイベントの発生や、非周期的な滑り挙動も観測される。図 5 に地震発生間隔の反復写像を示す。 i 番目のサイクルの時間間隔 T_i と $(i+1)$ 番目のサイクルの時間間隔 $T_{(i+1)}$ の関係は単純な曲線で表現でき、決定論的カオスを示す力学系の特徴をもつことがわかる。以上のことから、摩擦特性の空間分布が単純で、複数アスペリティの相互作用がない場合でも、滑り挙動の時間変化は複雑になる可能性があることがわかる。

・地震サイクルシミュレーションモデルの開発（名古屋大学）

従来、準静的な応力蓄積から破壊核形成を経て動的破壊へと至るプロセスの連成シミュレーションを行っていたが、1 サイクル目の動的破壊後の応力状態を受け渡して 2 サイクル目の解析を続けて行うことができるようになり、1968 年十勝沖地震の震源域を想定した計算を実施した。その結果、2 サイクル目の計算では 1 サイクル目よりも急速な応力蓄積が生じ、地震発生間隔が短縮されたが、これはアセノスフェアの粘性緩和が主たる要因と考えられる。これによって、地震サイクルの全過程をシミュレーションできる見通しが立った。

(b) 地殻変動データを用いたデータ同化手法の開発と同化実験

・アジョイント法によるデータ同化手法の開発（京都大学）

プレート境界の断層滑りはプレート運動や地震による応力変化によってプレート境界の摩擦法則を満たしながら進行する。すなわち、断層滑りの詳細な履歴に基づいてプレート境界面の摩擦法則を推定することが可能と考えられ、本研究では、気象・海洋分野で開発されたデータ同化手法であるアジョイント法による摩擦パラメタの推定手法の開発を行った。具体的には、2003 年十勝沖地震の余効滑りを扱い、摩擦法則としては速度・状態依存摩擦構成則を仮定し、シミュレーション計算の結果に基づく模擬データを用いて摩擦パラメタ (a, b, L) を推定し、真の値との比較を試みた。当初は断層セル 2 つといった単純なケースから検討を始め、プレート境界面を $10\text{km} \times 10\text{km}$ の小断層に分割し、余効滑りの空間伝播を表現できるモデルへと拡張した。その結果、初期値と異なる値を仮定した場合でも真の値に近い値に収束する結果が得られた。また、2003 年十勝沖地震の発生後に発生した 2004 年釧路沖地震について、発生時期のより良い予測が行えることが示された。

・余効滑りに基づく摩擦パラメタの推定（東京大学）

現実の断層に対して、摩擦構成則を用いた地震サイクルの数値シミュレーションを行うためには、断層面の摩擦特性を知ることが必要である。そこで本研究では、GPS データから断層面の摩擦特性を推定するための手法開発を行った。まず、GPS により観測された余効変動と摩擦構成則に基づく一自由度モデルについて、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて摩擦パラメタの事後確率分布を推定するための手法を開発した。この手法を 2003 年十勝沖地震後の GPS 時系列に適用し、速度・状態依存摩擦法則の 3 つのパラメタ L, a 、 $(a-b)$ を推定した。次に、データ同化で使用される手法である粒子フィルタとカルマンフィルタを用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震後の余効滑りと滑り速度の時空間変化を GPS 時系列データから 1 日毎に精密に推定した。この結果から、定常摩擦応力の速度依存性を表すパラメタ $(a-b)$ が滑り速度に依存するか、有効法線応力が時間変化したことを示した。さらに、摩擦構成則に基づく現実的なモデルを用いて摩擦特性を推定するために、東北地方太平洋沖地震の余効滑りの三次元モデルの開発を行った。この他、大自由度モデルや多種データを用いたデータ同化やインバージョン解析を行うために、線形・非線形混合モデルに対してモデルパラメタ、先験情報・異種データ間の相対的な重みを効率的にベイズ推定するアルゴリズムを開発した。

平成 25 年度は、2011 年東北地方太平洋沖地震の余効滑り発生領域の断層摩擦特性を GPS 観測データと物理モデルに基づき、データ同化により推定するために、観測データと比較可能な余効滑りの三次元物理モデルの構築を行った。モデルでは、プレート境界面上の滑り速度と応力の時間発展は速度・状態依存摩擦法則から導かれた速度強化の定常摩擦に従うと仮定した。GPS により得られた本震時の変位から地震時の滑り分布を推定し、それに基づいて計算されたプレート境界面上における地震時の応力変化を与えてその後の余効滑りの時空間変化を計算した(図 6)。モデルにより計算された余効滑りは地震時の滑りが大きい領域の周囲に集中しており、滑りの空間パターンの時間変化はほとんど見られなかった。モデル計算と GPS データのインバージョン解析により推定された地震後 7 ヶ月間の積算余効滑りが適合するように定常摩擦応力の速度依存性を表すパラメタを推定したところ、 $(a-b) = 0.2 \text{ MPa}$ という結果が得られた。本研究では $(a-b)$ が定数であると仮定したが、モデル計算の結果とインバージョン解析により推定された余効滑りの時空間変化には系統的な差異が残っており、 $(a-b)$ の空間変化や、前年度の研究で推定された $(a-b)$ の滑り速度依存性等をモデルに取り入れることを検討する必要がある。

・測地データを用いたプレート境界滑り分布の推定(名古屋大学)

プレート境界面上における地震の発生を考える際に、観測データに基づく断層滑りの時空間分布は重要な境界条件を与える。測地データを用いた地震時および非地震時のプレート境界滑り推定について研究を実施し、以下の成果を得た。

(1) 西南日本の GPS データを用いて南海トラフのプレート境界面上における滑り遅れ分布を明らかにし、特に滑り遅れが豊後水道付近にまで及ぶことを指摘した(H21 年度)

(2) 豊後水道で繰り返し発生しているスロースリップでは、長期的な応力蓄積が生じていないことを見出した(H22 年度)。また、繰り返した 3 回のイベントについて滑りの時空間分布を比較し、プレート境界面上の同じ場所では、同一の滑り-応力関係に従って滑りが進展すること、スロースリップ域とその周囲は、それぞれ滑り弱化和滑り強化の性質で特徴付けられることを見出した(H23 年度)。

(3) 四国周辺では大地震時の滑り域、地震後の余効滑り域とスロースリップ領域の三者が空間的に棲み分けていることを見出した(H22 年度)。

(4) プレート境界の力学的な固着分布と、それから予想される地表の地殻変動データを用いて滑り遅れ分布を推定した結果の定量的な比較を行い、測地データに基づく推定が、固着域の規模やモーメント蓄積率を過大評価する傾向があることを明らかにした。(H21, H24 年度)

(5) 東北地方太平洋沖地震について、有限要素法を用いて 3 次元不均質構造やアセノスフェアの粘性を考慮し、地震時および地震後の滑り分布を推定した。その結果、粘弾性の影響を考慮することで、宮城沖で地震後に観測された急速な西向き変位が説明できること、粘弾性の効果を考慮しないと余効滑りを大幅に過大評価する恐れのあることがわかった。推定された余効滑りは本震の滑り域や過去の大地震の震源域の分布と相補的であり、地震後 2.5 年間で最大約 2m に達しているが、プレート境界の深さ 50km 深部には及んでいないと考えられる(図 7)(H25 年度)。

(c) 地震活動データの活用手法の開発

・小繰り返し地震によるプレート間滑りのモニタリング(東京大学)

日本列島全域に展開されているテレメータ地震観測点で観測された地震波形記録の蓄積を行い、小繰り返し地震群の抽出を行った。また、小繰り返し地震群の規模・発生位置および発生間隔の情報を基にして日本列島下に沈み込む太平洋プレートおよびフィリピン海プレートにおけるプレート間滑りの時間・空間変化の推定を行った。その結果、比較的定常的に発生する小繰り返し地震群が琉球海溝から沈み込むフィリピン海プレートおよび、千島-日本海溝から沈み込む太平洋プレートの上部境界で多数見つかった。小繰り返し地震の発生は、各地域のプレート間固着状態を反映した特徴を示しており、琉球弧では、解析期間を通してプレート間の相対運動速度とほぼ一致しているかやや小さい一方、東北日本弧では、大地震とその余効滑りの発生による滑り速度の時空間変化が見られた。特に、平成 23 年東北地方太平洋沖地震発生前後には、プレート間滑りの時空間変化が顕著に見られた。地震発生前の約一ヶ月の間には、本震の破壊開始点に向かって 2 度にわたりスロースリップの伝播が生じ、こ

これらのスロースリップの伝播が引き起こす応力の集中により、本震発生が促進された可能性を示した。本震発生後には震源域周辺の広い領域で発生した余効滑りが確認された。その速度は、時間経過とともに徐々に減少しているが、震源域の北西側では現在もプレート間相対運動速度より速い状況が続いている。また、余震発生域と大滑り域の相補関係を東北沖地震の余震活動に適用し、東北沖地震発生時の大滑り域が複雑な形状を示すことを明らかにした。小繰り返し地震も大滑り域の外側に多数分布していることから、大滑り域から解放された応力によって、その外側で余効滑りが駆動されている事が示唆された。さらに、震源情報を用いた地震クラスターの自動抽出を行い、各クラスターの地震活動を調査し、三陸沿岸地域や先島諸島周辺のプレート境界において、定常的に発生する小繰り返し地震を含む孤立した地震クラスターを多数発見した。中でも、波照間島沖合に位置するクラスターの地震発生時系列は、隣接地域で規則的に発生するスロースリップイベントと部分的に同期しており、プレート間固着状態の変化との関連性が示唆された。

平成 25 年度は、平成 23 年東北地方太平洋沖地震発生前後の関東地方周辺の太平洋プレートおよびフィリピン海プレートにおけるプレート間滑りの時空間変化に焦点を当てて小繰り返し地震の解析を行った。各プレートにおける滑り速度は、関東地方のプレートモデルを構築し、それぞれのプレート境界近傍で発生した地震を選び出すことによって推定した。その結果、両プレートともに、東北沖地震発生前の滑り速度は、プレート間相対運動速度と比べてやや小さかったが、地震後に増加したことが明らかとなった。太平洋プレート境界での余効滑りは、フィリピン海プレートとの接触域を越えた深部にまで広がっていた。その速度は本震発生後徐々に減少し、現在はほぼプレートの相対運動速度程度まで低下している。一方、フィリピン海プレートの滑り速度は、本震発生後数ヶ月の間、最大余震の西側で顕著に増加した。プレート間大地震発生による局所的な応力変化や地震後の余効変動の影響によって引き起こされたのかもしれない。

- ・ 中規模の繰り返し地震によるプレート境界滑り監視（東北大学）

繰り返し地震の抽出方法の検討により、M4 以上の中規模の地震についても繰り返し地震の抽出ができるようになった。これにより、2011 年東北地方太平洋沖地震前後の繰り返し地震活動変化から、非地震性滑りの推移を得た。また、東北地震の余効滑りの繰り返し地震の破壊過程への変化についても検討した。

平成 25 年度は、東北地方太平洋沖地震後の繰り返し地震の活動のモニタリングを引き続き行うとともに、東北地方太平洋沖地震後の繰り返し地震のマグニチュード変化について調べた。この地震後に地震の規模が大きくなっているグループが余効滑り域内で多く、規模が大きくなった繰り返し地震の 1 つである釜石沖地震について、滑り域の推定からこの規模の大きな地震は滑り域が広いことを明らかにした。このような滑り域の変化現象は不安定滑りを起こす領域の周囲での条件付き安定領域の存在を示唆している。また、2011 年東北地方太平洋沖地震前のスロースリップについて情報を整理した。本震の 10 年程度前から、GPS や繰り返し地震から滑りの増加が報告されている。この期間には図 8 の南側の細い赤四角の領域で、エピソード的な滑りがみられる。その後 2008 年に、やや海溝に近い太い赤長方形の近く、および南と北の 2 つの細い赤四角でスロースリップが推定され、2011 年に入ると、太い赤長方形の場所でふたたび滑りが見られるとともに、2 回の震源移動のうちの最初の移動が 2 月に見られた（白丸）。その後、2011 年 3 月 9 日の前震が水色の領域で発生し、その後の余効滑りが、薄緑色の領域や北側の細い赤四角で推定された。また、この時期には本震の震央（橙色星）に向かう滑りの伝播を示すと考えられる 2 度目の震源の移動（黄丸）も見られた。これらの滑り変化は、巨大地震前の現象を多種類のデータから捉えたものであり、現実的な地震発生シミュレーションに役立つものと考えられる。

- ・ 均質な地震カタログに基づく地震活動評価（北海道大学）

地震活動から地殻活動予測に必要な広域応力場の時間変化を検出するためには均質な地震カタログが必要である。そこで、1994 年 1 月 1 日から 2007 年 12 月 31 日までの期間に関東および東海・東南海地域で発生した $M_{JMA} \geq 3.3$ 以上の地震の震源および M を同一の観測点を用いて再決定し、均質な地震カタログを整備した。この地震カタログを精査した結果、2005 年 8 月から 2007 年 12 月の間、茨城

県南部から東京湾にかけて地震活動が活発化し、銚子沖で地震活動が静穏化したことが見出され、銚子沖の太平洋プレート上面で長期的スロースリップが発生した可能性を指摘するとともに、GPSデータに関連した変位を見出した。

(8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Fukuda, J., A. Kato, N. Kato, and Y. Aoki (2013), Are the frictional properties of creeping faults persistent? Evidence from rapid afterslip following the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3613-3617, doi:10.1002/grl.50713.

Katsumata, K., and S. Sakai, Seismic quiescence and activation anomalies from 2005 to 2008 beneath the Kanto district, central Honshu, Japan, *Earth Planets Space*, 65, 1463-1475, 2013.

Ohtani M., K. Hirahara, T. Hori and M. Hyodo, and Mamoru 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.*, 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.

Uchida, N., and T. Matsuzawa, Pre- and post-seismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 374, 81-91, doi:10.1016/j.epsl.2013.05.021, 2013.

Uchida, N., K. Shimamura, T. Matsuzawa, T. Okada, Postseismic response of repeating earthquakes around the 2011 Tohoku-oki earthquake: Moment increases due to the fast loading rate, *J. Geophys. Res.*, under review.

内田直希・伊藤喜宏・加藤愛太郎・太田雄策, 東北地震から 3 年: 東北地方太平洋沖地震前にみられたスロースリップ, *なみふる*, 97 号, 2014, 印刷中.

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, 日本惑星科学連合 2013 年大会, STT59-01, 2013.

Igarashi, T. (2013) Small repeating earthquakes and inter-plate aseismic slip after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, IAHS-IASPO-IASPEI Joint Assembly, S102PS.01, Gothenburg.

Igarashi, T., T. Idaka, S. Sakai, K. Obara, and N. Hirata (2013) Small repeating earthquakes and inter-plate aseismic slip in and around the Kanto district after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, American Geophysical Union Fall Meeting, S11B-2341, San Francisco.

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, 2013.

鈴木翔太・伊藤武男・里嘉千茂・兵藤守, 3次元地下構造を考慮した有限要素法による 2011 年東北沖地震の粘弾性応答, 日本地震学会秋季大会, 2013 年.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

名古屋大学大学院環境学研究科 : 鷺谷威、橋本千尋, 伊藤武男

他機関との共同研究の有無 : 有

東京大学地震研究所 : 加藤尚之、加藤照之, 五十嵐俊博、福田淳一

京都大学大学院理学研究科 : 平原和朗、宮崎真一

京都大学防災研究所 橋本学

東北大学大学院理学研究科 : 内田直希、松澤暢

北海道大学大学院理学研究院 : 勝俣啓

海洋研究開発機構 堀高峰

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：名古屋大学大学院環境学研究科
 電話：052-789-3046
 e-mail：web-master@seis.nagoya-u.ac.jp
 URL：http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/

(11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：鷺谷威

所属：名古屋大学大学院環境学研究科

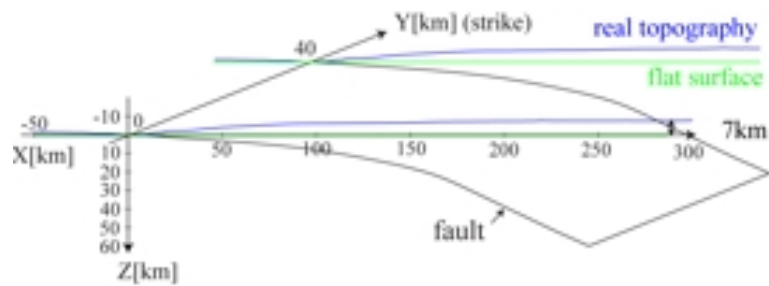


図1 日本海溝に沈み込む太平洋プレートを模したモデル(大谷・平原, 2013)。

水深7kmの日本海溝をZ=0kmとし、深さ方向にZ軸、プレート走行方向にY軸をとっている。青線が海底地形を表す。走行方向には構造は一樣とする簡単化を行なっている。

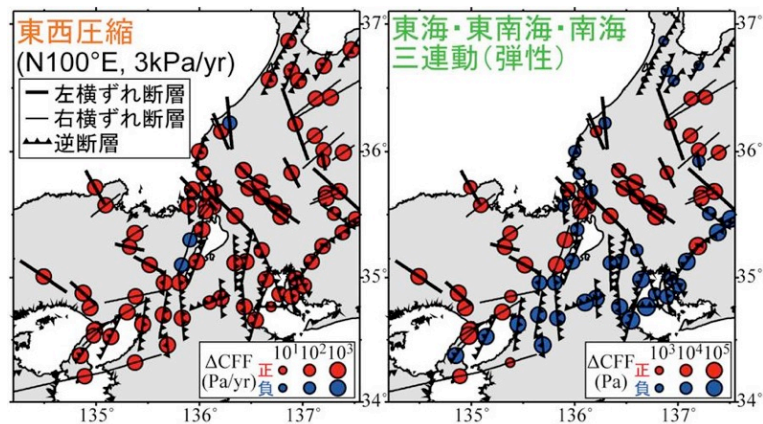


図2 西南日本内陸活断層における応力変化。

(左図): 0.3×10^{-7} 年の東西圧縮による各断層におけるクーロン応力変化($\mu' = 0.3$ を仮定)。(右図): 100年間の固着を仮定した時の南海トラフ巨大地震時における各活断層のクーロン応力変化。(赤：正、青：負)(鹿倉・他, 2012)。

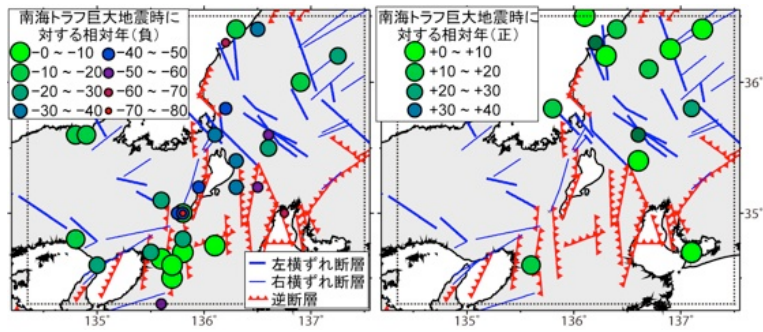


図3 南海トラフ巨大地震の発生前(左)と発後(右)の歴史地震発生の時空間分布。(鹿倉・他,2012)

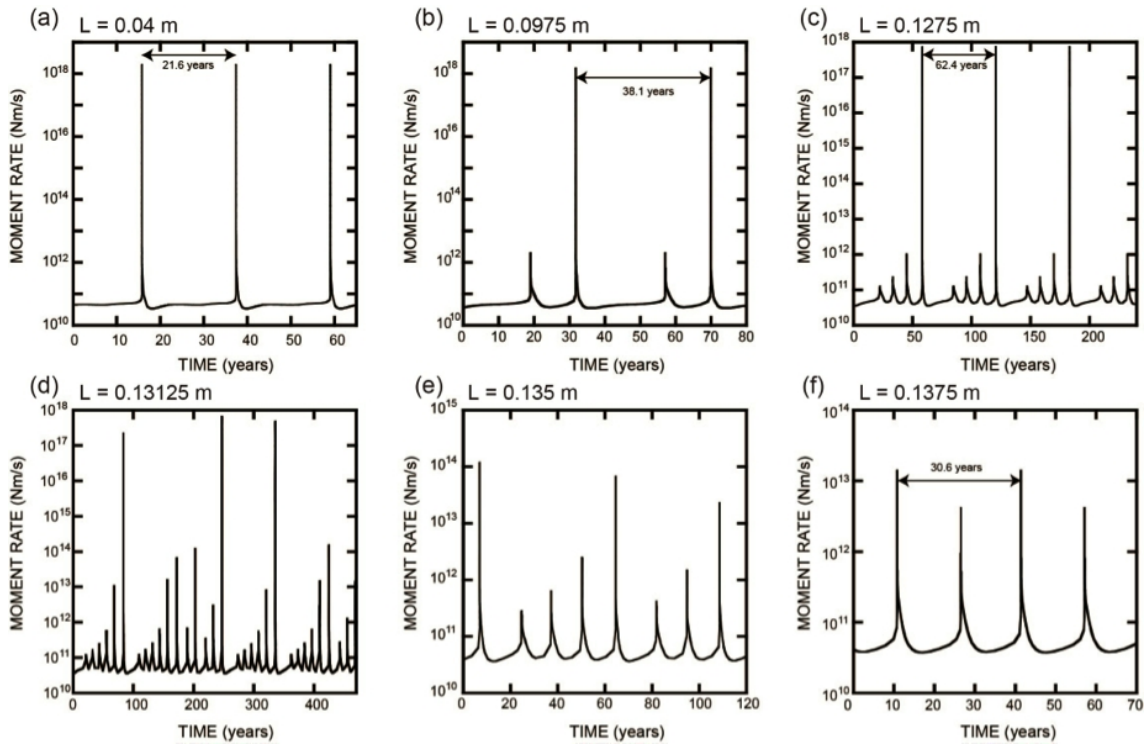


図4 モーメント解放率の時間変化のシミュレーション結果。

速度弱化域で $A-B = -0.5$ MPa、速度強化域で $A-B = 0.2$ MPa。特徴的のり量 L は断層面上で一様で、(a) 0.04 m、(b) 0.0975 m、(c) 0.1275 m、(d) 0.13125 m、(e) 0.135 m、(f) 0.1375 m。(a) では周期的に地震が発生する。(b) では地震と非地震性滑りイベントが交互に発生する。(c) では1周期の中に1つの地震と3つの非地震性滑りイベントが含まれる。(d) では非周期的になり、地震と非地震性滑りイベントが不規則に発生する。(e) も非周期的だが、非地震性滑りのみ。(f) は2種類の非地震性滑りイベントが交互に発生する。

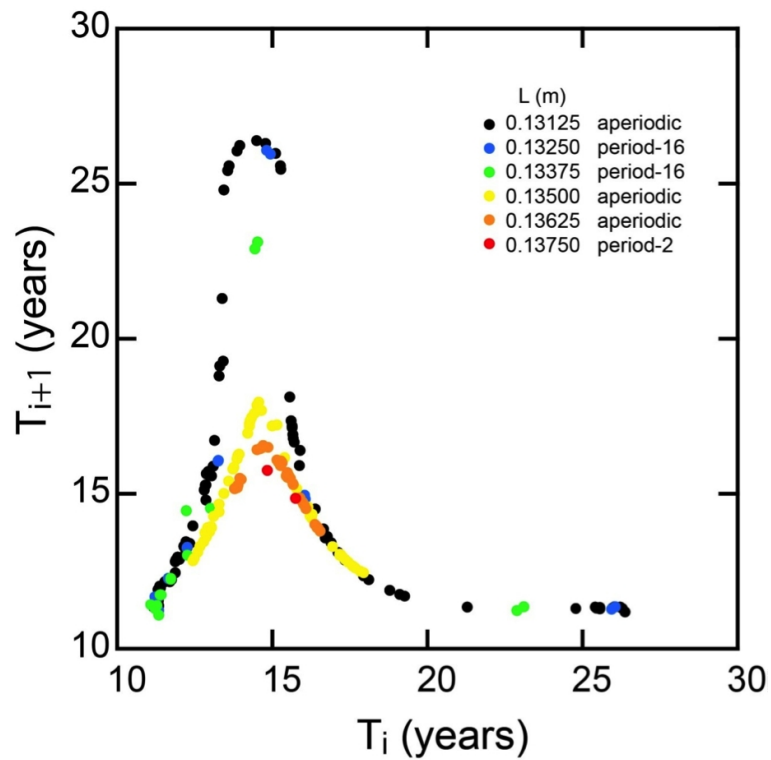


図5 地震発生間隔の反復写像。

i 番目のサイクルの時間間隔 T_i と $(i+1)$ 番目のサイクルの時間間隔 $T_{(i+1)}$ の関係。速度弱化域で $A-B = -0.5$ MPa、速度強化域で $A-B = 0.2$ MPa、 $L=0.13125 \sim 0.13750$ m。

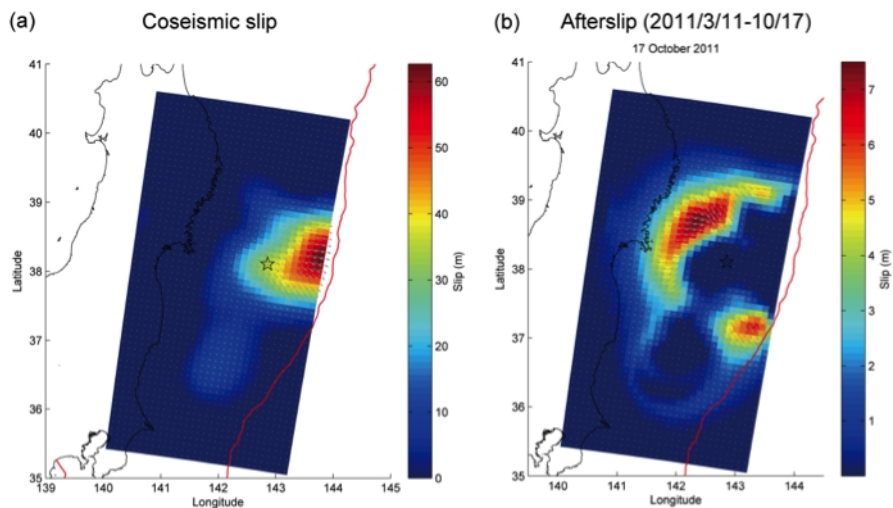


図6 余効滑りから推定した摩擦パラメタによる滑り分布の再現。

(a) GPSデータのインバージョンから推定された2011年東北地方太平洋沖地震の滑り分布。余効滑りのシミュレーションの初期条件を計算するために使用した。(b) 摩擦構成則に基づくシミュレーションから計算された余効滑りの滑り分布(2011/3/11-10/17)。

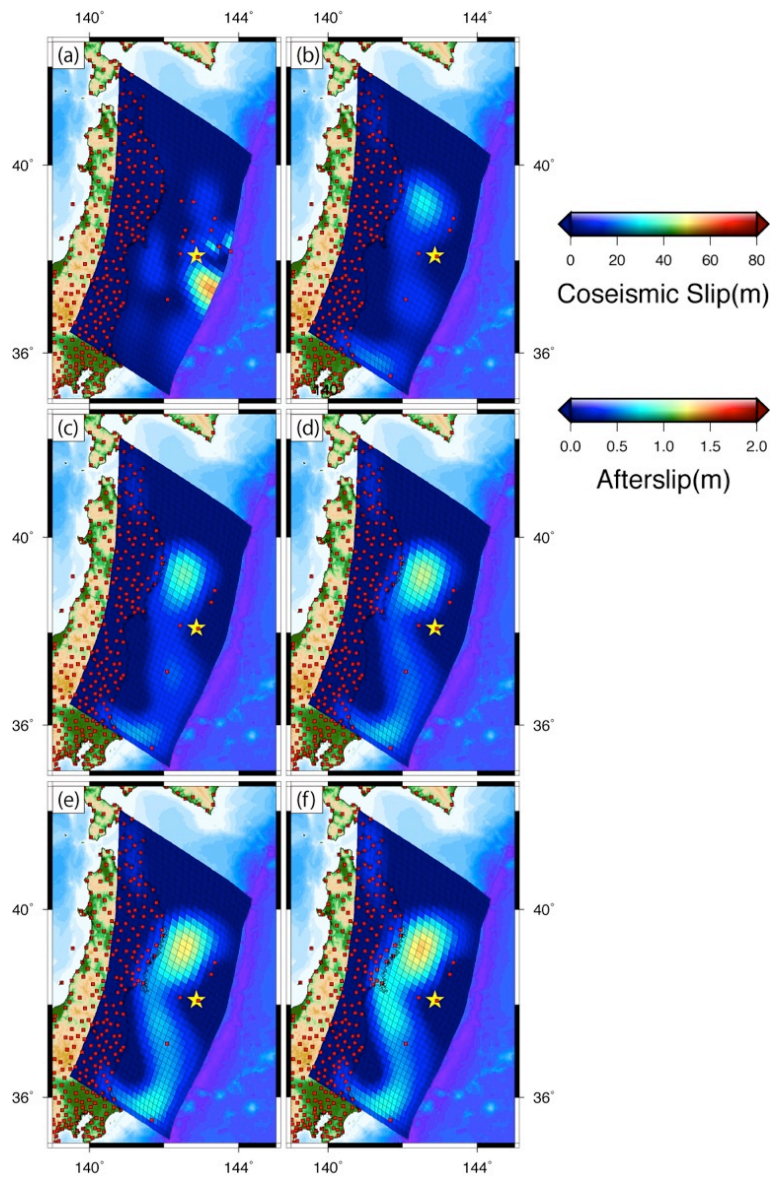


図7 粘弾性応答関数を用いたインバージョン結果。

(a) 地震時の滑り分布。(b-f) は積算された余効滑り分布。(b) 地震後0.5年 (c) 地震後1年 (d) 地震後1.5年 (e) 地震後2年 (f) 地震後2.5年。

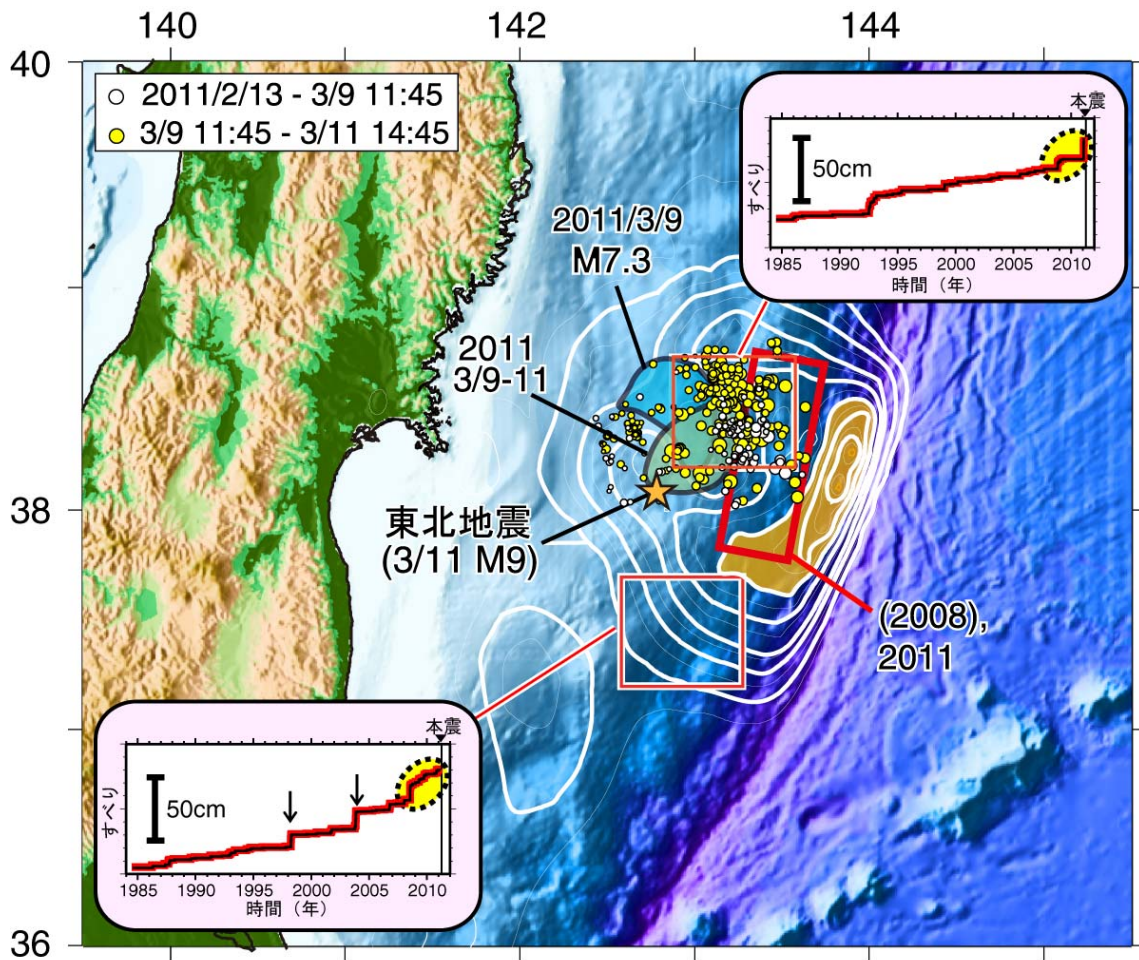


図8 東北地震前に震源域周辺でみられた様々な滑り(内田・他, 2014 を改変)

赤細線の四角領域での滑りは小繰り返し地震によるもの(Uchida and Matsuzawa, 2013)、赤太線矩形領域での滑りは、海底圧力、陸上ひずみデータによるもの(Ito et al., 2013)、白と黄色の丸は、3月9日前と後の地震活動(Kato et al., 2012)、青と緑の領域は、水圧計のデータおよび陸上GPSデータによる3月9日の前震の地震時滑りとその後の余効滑り(Ohta et al., 2012)を示す。図中の日付はそれぞれのイベントの発生時、橙色星は本震の震央、白いコンターはIinuma et al., (2012)による本震の滑り分布を示す。