

(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さら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、これらのシステムおよ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すべ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および予測実験

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およ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、すべ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すべ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、余効すべ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すべ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、すべ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、すべ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、余効すべ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すべ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、プレート境界のすべ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すべりによるものと仮定して、すべ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すべ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) 平成 23 年度成果の概要：

(a) 地殻活動予測シミュレーションモデルの開発研究および予測実験

・ M9 地震の発生を説明する地震サイクルモデル (東大地震研)

2011 年東北地方太平洋沖地震 ($M_w=9.0$) の発生を説明する力学モデルを提案した。地震時すべりが最大であった領域の強度 (破壊エネルギー) が大きかったとすると、巨大地震が数百年間隔で発生すること、宮城沖地震発生領域深部において、過去の M7 級の地震から推定されるカップリング率が数十%と小さいにもかかわらず GPS 観測から推定される固着が大きかったことが説明可能であることが示された (Kato and Yoshida, 2011)。このモデルによる巨大地震のすべりの深さ分布を図 1 に示す。海底地殻変動や津波データから推定された宮城沖でのすべり量分布に近い結果が得られている。高強度領域の形成メカニズムについては、断層帯内の透水性の不均一性による間隙流体圧の深さ分布で説明可能であることを示した (Yoshida and Kato, 2011)。また、地震時すべりが最大であった領域の強度を大きくするかわりに、この領域に高速すべり時の摩擦発熱による急激な強度低下がある場合も、巨大地震の発生サイクルやすべり量分布を説明できることがわかった (Mitsui et al., 2012)。

プレート境界で固着領域と非地震性すべり域が存在する場合、固着域端におけるエネルギー解放率と破壊エネルギーの関係が地震の発生を支配する。このことから、地震の発生間隔や応力降下量は、破壊開始点での破壊エネルギーに依存することが期待されるが、数値シミュレーションによりこれを確かめた (Kato, 2012)。

現実の地震発生サイクルは、地震の規模、発生間隔ともに大きなばらつきをもつが、この原因を明らかにすることは地震の予測のために重要である。2 自由度のバネ-ブロックモデルを用いて、摩擦特性の不均一性が地震発生サイクルの不規則性に及ぼす影響を調べた。図 2 に発生したイベントの振幅に関する分岐図を示す。分岐を繰り返しカオス的な地震サイクルが表れることがわかる。バネの強さが摩擦パラメーターから決まる臨界バネ定数に近いときに不規則な地震サイクルになりやすいことがわかった (Abe and Kato, 2012)。

現実的な不均質媒質での動的破壊過程の数値シミュレーションのために、有限要素法によるプログラムを開発し、単純な場合について、差分法、境界積分法等による過去のシミュレーション結果と比較することにより、精度の検討を行った。その結果、破壊先端の凝着領域よりも十分に小さなメッシュサイズを用いることにより、実用的に十分な精度でシミュレーションが可能であることを確認した (Yin et al., 2012)。

・ 準静的地震発生サイクルシミュレーションコードの高速化：2011 年東北地方太平洋沖地震サイクルシミュレーションへの適用 (京大)

昨年度開発した階層型行列 (Hierarchical matrices : H-matrices) 法 (Ohtani et al., 2011) を用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震サイクルの大規模シミュレーションを行なった。3 次元形状を持つ込み込む太平洋プレート境界 (馬場・他, 2006) を $N=200,704$ 個の三角セルに分割し、すべり応答関数行列に H-matrices 法を適用して省メモリ化・高速化を図り、大規模マルチスケールシミュレーションを実行した。階層アスペリティモデル (Hori and Miyazaki, 2011) と浅部に強パッチを持つアスペリティモデル (Kato and Yoshida, 2011) といった 2 つのモデルに基づくシミュレーションを行なった (Ohtani, 2012)。その結果、両モデルとも、1) 海溝近傍浅部領域に数十 m の大きな地震時すべり、2) 宮城沖深部や茨城沖では M 7 クラスの地震が数十年間隔で繰り返し発生、3) この超巨大地震の繰り返し間隔は数百年といった観測されたこの超巨大地震サイクルの特徴を説明可能であることが分かった。

2005年以降の宮城沖や福島沖で発生した地震は、地震時すべりよりも余効すべりが大きい(Suito et al., 2011)。また、陸上GPSに基づくすべり遅れ分布から、福島沖は2000年まで固着していたが、2007年以降固着の剥がれが進行していた可能性が指摘されている(国土地理院, 2011)。図3は、両モデルによるすべりの集中した宮城沖浅部と福島沖の積算すべりの時間発展を示したものである。左図の階層アスぺリティモデルでは、宮城沖、茨城沖にM7クラスのアスぺリティ、宮城沖浅部に強いアスぺリティを持つが、M9震源域全体に条件付き不安定すべりの特性を与えているため、超巨大地震発生後アスぺリティ域外で剥がれが進行するにつれ、スロースリップを繰り返し発生するようになる。また、右図の強パッチを持つアスぺリティモデルも、福島沖に条件付き不安定すべり特性を与えているため、まわりの安定すべり域にすべりが発生し、ここでも繰り返しスロースリップが発生する。これらのモデルでは宮城沖地震の余効すべりにより超巨大地震はトリガーされ、この領域の剥がれが直接超巨大地震の発生を意味するものではないことを示している。

・不均質粘弾性媒質中でのすべり応答関数の高度化(京大・東大地震研)

メッシュ作成が容易な3次元4面体要素および2次元3角形要素も扱えるよう並列有限要素法コードGeoFEMの改良を行なった。通常の並列計算機では正常に動くことを確認したが、ベクトル化には依然問題があり改良を継続中である。

・粘弾性媒質中での地震発生サイクルシミュレーション(京大)

粘弾性媒質中での応力計算には、時間依存のすべり応答関数とすべり速度の履歴積分が必要である。それにはすべり速度の過去の全履歴を必要とし、必要なメモリおよび計算量が大変なものになるため、地震発生サイクルシミュレーションでは、従来完全弾性体を仮定して行われてきた計算が殆どである。そこで、差分法による非弾性媒質中での波動場計算で開発されてきた、メモリ変数を用いて、計算メモリと計算量を抑える新手法を開発した(平原・他, 2011)。そこでは、すべり応答関数をM個の緩和関数で近似し、対応するメモリ変数を導入する。このメモリ変数は時間に関する1階微分方程式に従い時間発展する。この手法では、弾性体における応力計算と同じスキーム、すなわち弾性すべり応答関数とすべり遅れの代わりに(すべり遅れ-メモリ変数和)を用いればよく、履歴積分を必要としない。弾性媒質と同様に粘弾性媒質でもすべり応答関数の弾性応答部分のすべり応答関数にH-matrices法が適用でき実際の計算が可能になると期待される。

(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

・地表観測データによる余効すべり領域の摩擦パラメータの推定実験(京大)

京都大学では、アジョイント方法を用い、地殻変動データから断層面上の摩擦パラメータを推定する手法を開発している。今年度は、昨年度開発したアジョイントコードを用いて、地表で観測されたGPSの変位データから3つの独立した断層面上の摩擦パラメータが推定できることを、双子実験(synthetic test)を行うことによって示した。

昨年度同様、2003年十勝沖地震をモデルケースとした。破壊領域を1つの断層セルで近似し、周囲の余効すべり領域を10km四方のセルに分割し、以下の手順で双子実験を行った。

- 1) 適当な摩擦パラメータと初期値を与え、破壊領域で地震が起こった後の、余効すべりのシミュレーションを行う。与えた摩擦パラメータを「真の解」と呼ぶ。
- 2) 1)の結果得られたすべり速度と、半無限均質弾性体を仮定して得られる応答関数(Okada, 1992)を用いて、北海道や北東北のGEONET観測点55点における地表変位を計算する。この地表変位に観測ノイズを加えて、擬似観測データとする。
- 3) 「真の解」とは異なるパラメータから、アジョイント法により、データにもっとも適合するパラメータをiterativeに求める。ただし、余効すべり領域全体にわたって、摩擦パラメータは一様であるという仮定をおいている。

この結果、余効すべりをとらえたGPS地表変位データを用いて、すべての摩擦パラメータが、真の値の1パーセント程度の範囲内に求められることが分かった。このことは地表面における地殻変動観測から断層面上の摩擦パラメータが推定できる可能性を示唆している。今後、余効すべり領域における摩擦パラメータに不均質がある場合を検討し、実際に観測されたGPSデータの適用を試

みる。

・準動的すべり領域の摩擦パラメーターの推定実験（京大・海洋研究開発機構）

本年度は、21年度に行った2003年十勝沖地震を2つのアスペリティ系（準動的地震すべり面と2枚の余効すべり面）にモデル化し、データ同化により余効すべり面の摩擦パラメーター推定を行う双子実験を、更に準動的地震すべり面の摩擦パラメーター推定へと拡張した。この拡張のため、各すべり面のすべり速度計算に於ける可変計算時間刻みを保存し、観測データ（すべり速度）同化にそのまま適用できる計算時間刻み可変の4次元変分法データ同化手法を開発した。その結果、時定数の大きく異なる現象を同一の同化時間窓に入れる観測データ同化が可能となった。（現在、顕著な地震すべり発生20秒前から地震発生2年後程度までの同化時間窓を設定可能となっている。）

（1）準動的地震すべりの加速フェーズ及び減速フェーズの同時データ同化

すべり現象の開始から終了までの時系列全体に観測データ同化を適用し、データ同化時間窓位置に応じた摩擦パラメーターの拘束範囲全体像を把握可能となった。その結果として、準動的地震すべり面の摩擦パラメーター全てを拘束するためには、すべり速度の減速フェーズに加えて、加速フェーズに観測データを同化する必要があることが分かった。更に、線形モデルを用いた感度解析（ dV/da , dV/db , dV/dL ）に於いても、加速フェーズに強い感度があることを確認した。

（2）準動的地震すべり及び余効すべりの同時データ同化

準動的地震すべり・余効すべり双方を含む地震サイクルの1サイクル（次の地震を含まない）に対し、準動的地震すべり面の各摩擦パラメーター初期値に5～10%の摂動（ ）を与える双子実験を実施し、各摩擦パラメーターを真値との誤差1%以下の精度で回収できることを確認した。

・余効すべりに基づく摩擦特性推定（東大地震研）

余効すべりの時間発展から、地震サイクルシミュレーションの入力として必要なプレート境界面の摩擦特性に関する知見が得られる可能性があることがこれまでの研究から知られている。ここでは、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の余効すべりの時間発展の推定を行った。東北地方太平洋沖地震の本震直後から10月下旬までに国土地理院 GEONET で取得された GPS データを解析して観測点座標値を1日毎に推定したところ、大規模な余効変動が見られた。観測された余効変動がプレート境界面上の余効すべりによるものと仮定して、余効すべり分布の時間発展を時間依存インバージョン解析により1日毎に推定した。推定された余効すべりは主に、岩手沖から福島沖にかけての本震のすべり領域の深部と3月11日の15:15に茨城沖で発生した最大余震(M7.7)のすべり領域に隣接して分布していることが分かった（図4）。余効すべりの空間パターンの顕著な時間変化は見られなかったことから、余効すべりの伝播は本震直後の数日以内に起きたと考えられる。

・GPSデータに基づくスロースリップ領域の摩擦特性推定（名大）

豊後水道では、1997年、2003年、2010年にスロースリップが3度繰り返している。これらのイベントにおける断層すべり時空間分布を同一の手法で解析し、すべり-応力関係を推定した（若杉, 2012）。3度のイベントですべりの時空間変化は必ずしも同一ではないが、断層面上の同じ場所におけるすべり-応力関係は殆ど変化しておらず、推定された摩擦特性の推定がロバストであることが示された。また、スロースリップ域の中心部は弱いすべり弱化的特性を持ち、イベント中に約0.1MPa程度の応力低下が見られる一方、その周囲にすべり強化ないし弱化的見られない領域が存在することから、こうした不均質な摩擦特性分布によってスロースリップ領域が規定されていることが示された。

・不均質構造を考慮した地震時および地震後のすべり分布推定（名大）

有限要素法を用いて東北地方の3次元不均質構造を考慮した Green 関数を用いて2011年東北沖地震のすべり分布を求めた（伊藤・他, 2011）（図6）。解析の手法には、新たに開発した断層すべりの空間解像度の最適化手法を適用した。今回モデル化した領域は東北地方を中心とした1500km × 1600km × 400kmの領域で陸上および海底地形も考慮されている。2011年東北沖地震のすべり解析には、モデル化された領域に含まれる GEONET の観測点および海底 GPS 観測点（3カ所）を用いた。なお、有限要素法の解析には GeoFEM を使用し、Split Node 法で与えた断層すべりに対する地表の変位応答関数を求めた。

逆解析手法として新たに開発した空間解像度最適化手法を適用した。この手法はモンテカルロ法によりサンプリングされた各小断層間の相関係数に基づき空間解像度を最適化する。小断層間の相関が負の場合には、小断層間の推定値にトレードオフが生じていることを示すため、小断層を一回り大きな断層に設定することにより小断層間のトレードオフを解消する。これらの操作を繰り返すことで空間解像度を最適化する。この解析法は逆行列を使用せず、トレードオフパラメータを導入する必要がない。そのため、スムージングパラメータに依存しない解析が可能である。なお、本解析では先験情報として地震の大きさをマグニチュード 9 として解析している。

図 6 (d) は均質な異なる大きさの小断層での解析例である。なお、LEVEL1~3 の残差はほぼ同じで 99 % 程度である。LEVEL1 の解像度では小断層間に大きな相関が見られるため、トレードオフが生じている。図 6(e) は小断層間の相関を最適化したすべり分布を示している。ほかの解析結果と比較するとより陸側に近い場所で大きなすべりが推定されている。

(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スロースリップのモニタリング（東大地震研）

昨年度に引き続き、プレート間すべりの時空間変化を推定するために、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データの蓄積を行い、小繰り返し地震群の抽出を行った。また、震源情報を用いた地震クラスターの自動抽出を行い、地震クラスター毎の地震活動を調査した。特に本年度は、平成 23 年東北地方太平洋地震発生前後のプレート間すべりの時空間変化に焦点をあてて解析を行った。

まず、東北日本弧の南部では、21 世紀当初は強く固着していたものの、いくつか発生した M7 前後の地震の余効すべりの後、すべり欠損が小さくなる傾向が見られた。さらに、東北地方太平洋地震発生前の約 1 ヶ月の間に、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たことを明らかにした（図 7）。3 月 9 日の最大前震発生後に観察された 2 度目のすべりは、すべりの伝播速度、すべり量、すべり速度ともに 2 月に発生した 1 度目と比べて増加していた。これらスロースリップの伝播が引き起こす力の集中により、本震発生が促進された可能性が示された。

本震発生後に検出された小繰り返し地震の時空間分布は震源域周辺の広い領域で余効すべりが発生していることを示している（図 8）。関東地方下の太平洋プレート、フィリピン海プレートの上部境界でもプレート収束速度よりも速いすべりが生じていた。また、地震クラスターの地震活動を調べた所、発生する地震の規模が変化するなど、地震前とは異なる活動パターンを示すものが多数見られた。一方、地震時すべりが大きかった場所では、小繰り返し地震は全く抽出されていない。プレート境界の物理的特性が変化したことを示しているのかもしれない。

・中規模の繰り返し地震によるプレート境界すべり監視（東北大学）

前年度までに開発した方法を用いて、中規模の繰り返し地震を抽出し、プレート境界での準静的すべりの時空間変化を推定した（図 9）。大きな地震が多発し、小地震の解析が難しい 2011 年東北地方太平洋沖地震後の期間については、この手法が特に有効であった。得られた地震後のプレート境界での準静的すべりの履歴は、地震時すべり域に近い領域で急激なすべり増加（図 9 緑線）および少し離れた領域で遅れたすべり増加（図 9 青線）を示す。また、陸域に近いプレート境界でのすべりは、陸上の GPS 観測点で得られた変位とよく似た時間的推移をしている。これらの繰り返し地震から得られたすべりの推移は、実際のプレート境界の摩擦特性や準静的すべりによるすべり欠損の解放過程を知る上で重要なデータと考えられる。

・均質な地震カタログに基づく地震活動評価（北大）

地震活動の長期変化から広域応力場の時間変化を検出するために、1994 年 1 月 1 日から 2007 年 12 月 31 日までの間に関東地方および東海・東南海地域で発生した MJMA=3.3 の地震の震源および M を再決定した。その結果、2005 年 8 月から 2007 年 12 月にかけての約 2 年半、茨城県南部から東京湾にかけての深さ 30~60km では顕著な地震活動の活発化が観測された。さらに、同時期において銚子沖の深さ 20~50km では顕著な静穏化が観測された。これらの地震活動度変化を起こした領域は、2008 年 5 月 8 日に茨城県沖で発生した地震（M7.0 と M6.4）の深部延長部に位置している。

- (8) 平成 23 年度の成果に関連の深いもので、平成 23 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
Abe, Y. and N. Kato, 2012, Complex earthquake cycle simulations using a two-degree-of-freedom spring-block model with a rate- and state-friction law, *Pure Appl. Geophys.* (in press).
平原和朗・大谷真紀子・鹿倉洋介、2011, 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、2011 年日本地震学会秋季大会、静岡、D21-10。
Igarashi, T., 2011, Seismic activities of earthquake clusters and small repeating earthquakes in Japan before and after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *American Geophysical Union Fall Meeting*, U51B-0011, San Francisco.
Igarashi, T., 2011, Earthquake clusters with small repeating earthquakes in the Japanese Islands, *IUGG 2011*, 2546, Melbourne.
Ito, T., K. Ozawa, T. Watanabe, and T. Sagiya, 2011, Slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake inferred from geodetic data, *Earth Planets Space*, 63, 627-630.
伊藤武男・鷲谷威・兵藤守・野口巧美・里嘉千茂、モンテカルロ手法を用いた断層すべりに関する空間解像度の最適化手法の構築、*日本測地学会第 116 回講演会*
加納将行・宮崎真一・伊藤耕介・平原和朗、2011、アジョイント法による余効すべり時空間発展の予測手法の開発、*日本地球惑星科学連合 2011 年大会、幕張メッセ*。
Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, and N. Hirata, 2012, Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake, *Science*, doi:10.1126/science.1215141.
Kato, N., 2012, Dependence of earthquake stress drop on critical slip-weakening distance, *J. Geophys. Res.*, 117, B01301, doi:10.1029/2011JB008359.
Kato, N. and S. Yoshida, 2011, A shallow strong patch model for the 2011 great Tohoku-oki earthquake: A numerical simulation, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G04, doi:10.1029/2011GL048565.
勝俣啓、2008 年茨城県沖の地震 (M=7.0) に先行した地震活動の静穏化と活発化、C21-04、*日本地震学会 2011 年度秋季大会、静岡県コンベンションアーツセンター、静岡市、2011 年 10 月*。
Mitsui, Y., N. Kato, Y. Fukahata, and K. Hirahara, 2012, Megaquake cycle at the Tohoku subduction zone with thermal fluid pressurization near the surface, *Earth Planet. Sci. Lett.* (in press).
名古屋大学・海洋研究開発機構・東京学芸大学、3 次元不均質構造を考慮した 2011 年東北沖地震のすべり分布、2011 年 11 月地震予知連資料
Ohtani, M., K. Hirahara, Y. Takahashi, T. Hori, M. Hyodo, H. Nakashima and T. Iwashita, 2011, Fast computation of quasi-dynamic earthquake cycle simulation with Hierarchical Matrices, *Procedia Computer Science*, 1456-1465, 4.
Ohtani, M., Large-scale quasi-dynamic earthquake cycle simulation, 2012, Master Thesis, Graduate School of Science, Kyoto University.
Uchida, N., and T. Matsuzawa, Coupling coefficient, hierarchical structure, and earthquake cycle for the source area of the 2011 Tohoku earthquake inferred from small repeating earthquake data, *Earth Planets Space*, 63 (No. 7), 675-679, doi:10.5047/eps.2011.07.006, 2011
若杉貴浩、2012, Frictional properties of the Bungo Channel slow slip region deduced from geodetic data, *名古屋大学修士論文*。
Yin, J., N. Kato, T. Miyatake, K. Hirahara, T. Hori, and M. Hyodo, 2012, Assessment of the finite element solutions for 3D spontaneous rupture using GeoFEM, *Earth Planets Space* (in press).
Yoshida, S. and N. Kato, 2011, Pore pressure distribution along plate interface that causes a shallow asperity of the 2011 great Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G13, doi:10.1029/2011GL048902.

(9) 平成 24 年度実施計画の概要 :

- (a) 地殻活動予測シミュレーションモデルの開発研究および予測実験

日本列島周辺におけるプレート境界の摩擦特性推定を進め、列島規模で準静的応力蓄積と動的破壊の連成地震サイクルシミュレーションの開発を進める。また、シミュレーションの高速化のための検討を進め、日本海溝の地震サイクルモデルを高度化する。さらに、地震発生間隔等から破壊開始点での破壊エネルギーを推定するとともに、バネの強さ(セグメント間のカップリングの強さ)に着目し、地震発生サイクルの不規則性についての研究を進める。

(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

来年度は同化時間窓を少なくとも2つの地震が含まれる幅に拡大し、複数の地震を含む地震サイクルに対しデータを同化し、摩擦パラメーター及び初期値(v_0)推定を行う予定である。また、地震サイクルに於いて余効すべりの状態が次の地震に及ぼす影響を無視できないことから、この同時同化手法により準動的地震すべりと余効すべり間の誤差伝搬を検討する予定である。

東北地方太平洋沖地震については、余効すべりの時間発展・空間分布についてより詳細な解析を行い、その結果を基にシミュレーションモデルの構築とそれを用いたデータ同化に着手する。また、同時期の日本各地のプレート境界すべりの時空間発展を精査するとともに、南海トラフでの明治時代以降のすべりの時空間発展についても再検討を行う。

(c) 地震活動データの活用手法の開発

小繰り返し地震解析および地震クラスター解析を引き続き行い、プレート境界のすべり、摩擦特性について検討する。東北日本地域では、平成23年東北地方太平洋沖地震後のプレート間すべりの変化を、小繰り返し地震活動を基に調査する。また、地震クラスターの地震活動と、プレート間すべりの時間変化や周辺で発生した大地震との関係を詳細に調べる。

今年度の解析で検出された地震活動の静穏化と活発化は、スロースリップイベントが起きたと仮定すると説明できることを示し、論文としてまとめる。

(10) 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: 鷲谷威、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

(11) 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/>

(12) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 鷲谷威

所属: 名古屋大学大学院環境学研究科

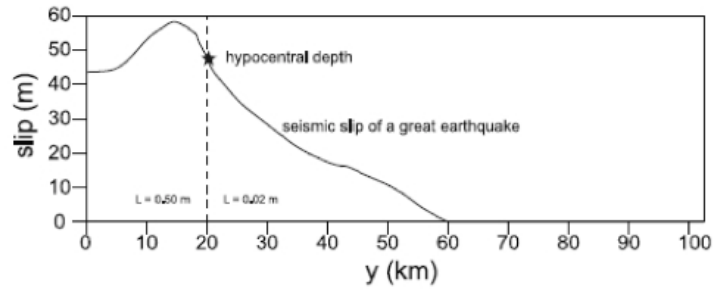


図1 シミュレーションで得られた巨大地震時のすべり量の深さ分布。星印は破壊開始点を示す。深さ 20km 以深では特徴的すべり量 $L=0.02\text{m}$ ，20km 以浅では $L=0.5\text{m}$ を仮定した。

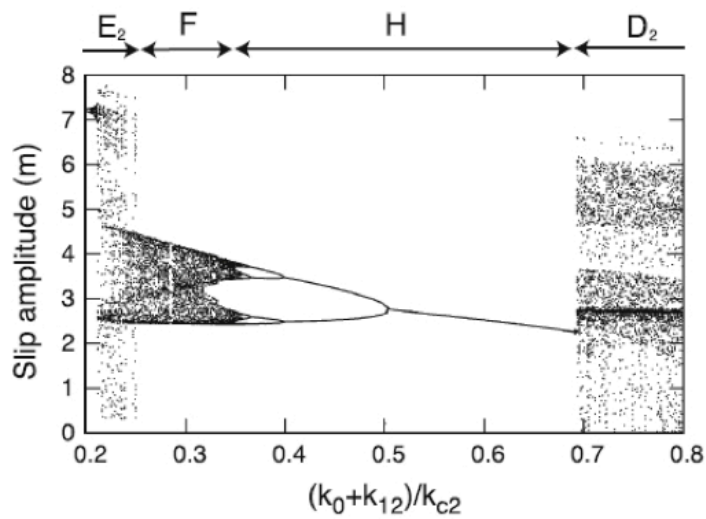


図2 2自由度バネ-ブロックモデルを用いた地震サイクルシミュレーションで得られたイベントの振幅に関する分岐図
 k_0 は 2つのブロックとドライバーをつなぐバネの強さ， k_{12} は 2つのブロックをつなぐバネの強さ， k_{c2} は第2ブロックの底面にはたらく摩擦パラメーターから計算された臨界バネ定数である。

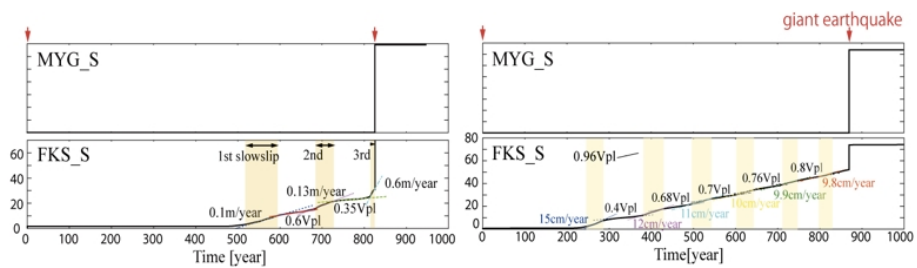


図3 超巨大地震サイクル中での宮城沖浅部と福島沖浅部における積算すべりの時間発展。左図は階層アスペリティモデル、右図は強パッチアスペリティモデル。(Ohtani,2012)

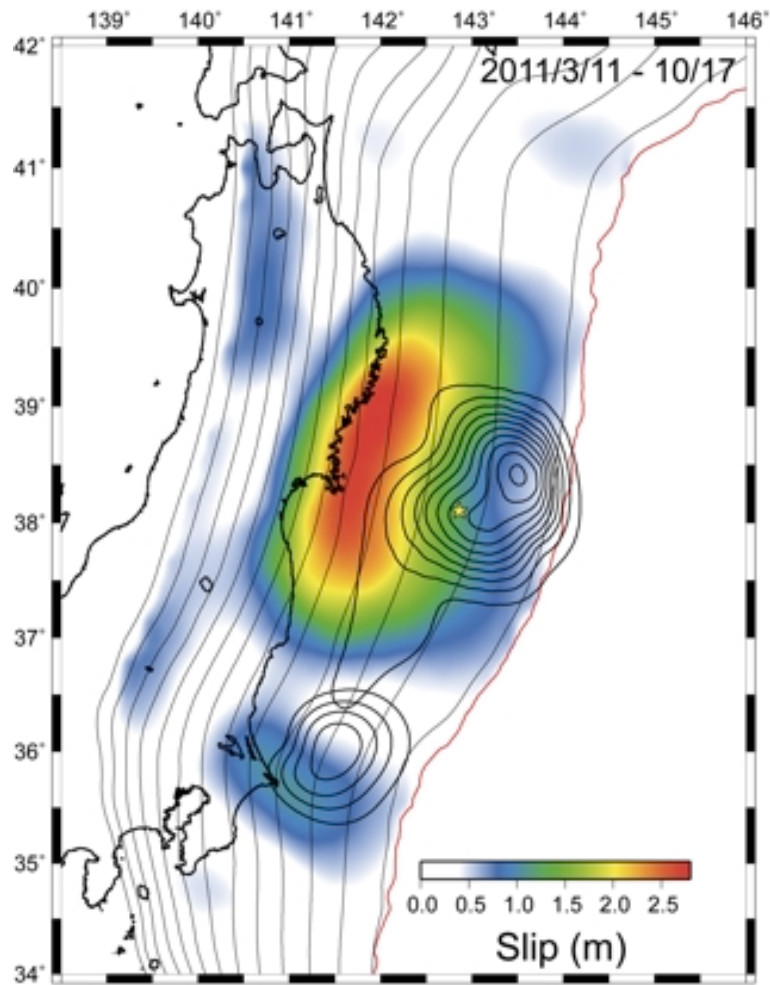


図4 東北地方太平洋沖地震後約7ヵ月間(2011/3/11~10/17)の余効すべり(カラー)及び本震・最大余震のすべり分布(等値線)。

等値線間隔は本震に対して5m,最大余震に対して0.5mである。黒の細実線はプレート境界面の等深線を深さ10kmから130kmまでの10km間隔で示している。

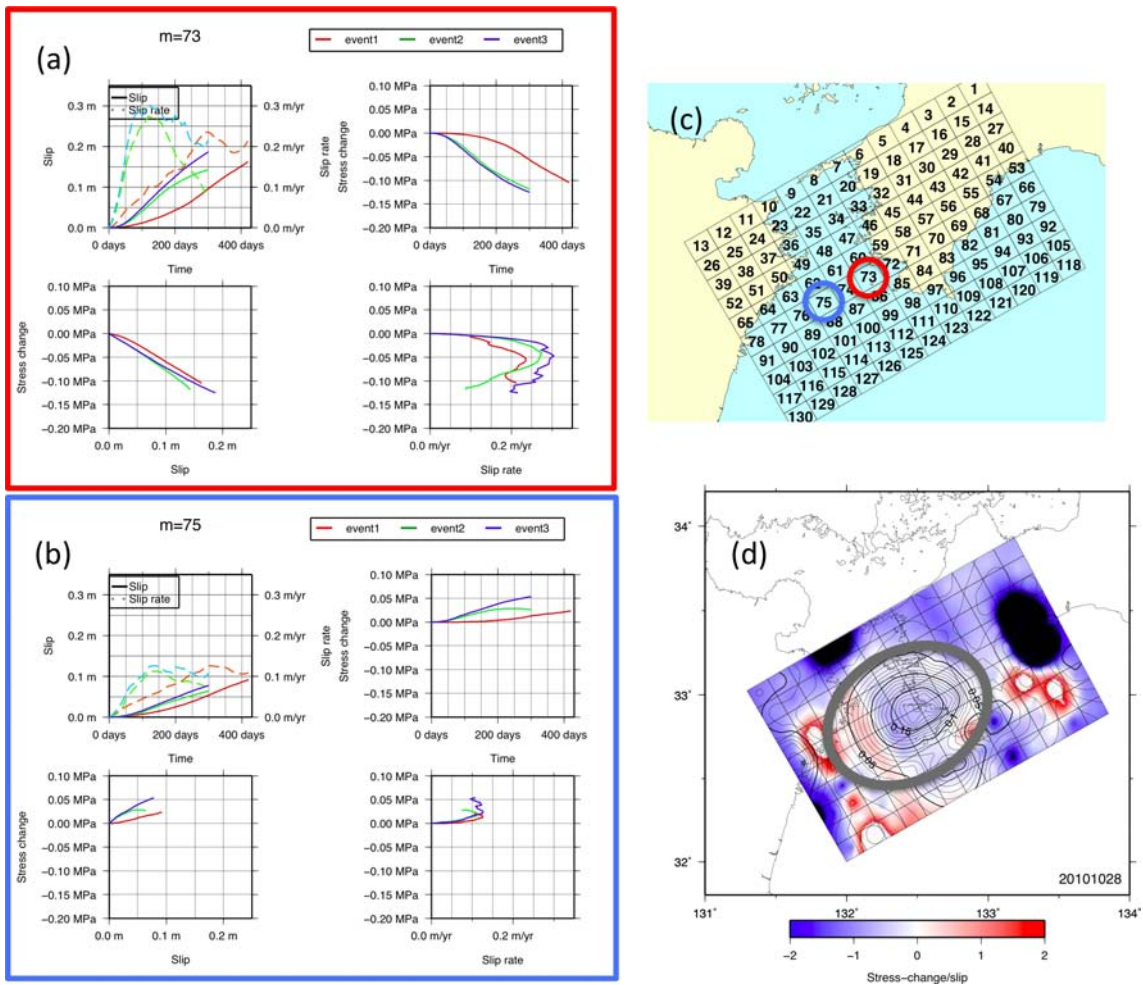


図5 GPSデータから推定した豊後水道スロースリップ域の摩擦特性。

(a) すべり域の中央部に近いすべり弱化領域における摩擦特性。すべりの時間変化，すべり速度の時間変化，すべりー応力関係，すべり速度ー応力関係を3回のイベントから求めた結果を重ねて表示している。(b) すべり域縁辺部のすべり境界域における摩擦特性。(c) 解析に使用した断層面と例示したすべり域の場所。(d) すべりー応力間の比例係数の分布。すべりが5cmを越える灰色の楕円内部で信頼できる値が得られている。青で示された中央部のすべり弱化域の回りに赤で示されたすべり強化域が存在している。

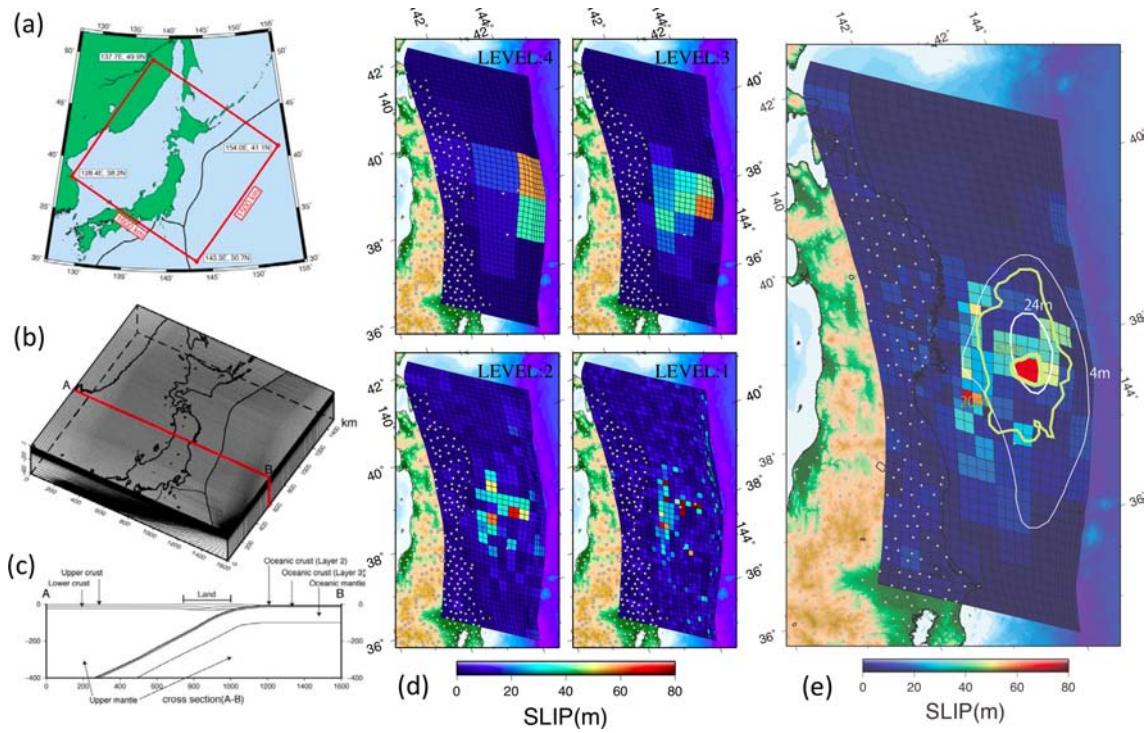


図6 不均質構造を考慮した東北地方太平洋沖地震の断層すべり分布
 (a)FEMのモデル領域。(b)モデル領域のFEMメッシュの鳥瞰図。(c)断面図。(d)解像度を変化させた場合のすべり分布。(e)空間解像度の最適化後の断層すべり分布。すべり分布を示すコンターは Ozawa et al. (2011) (白)および Simons et al. (2011)(緑)。

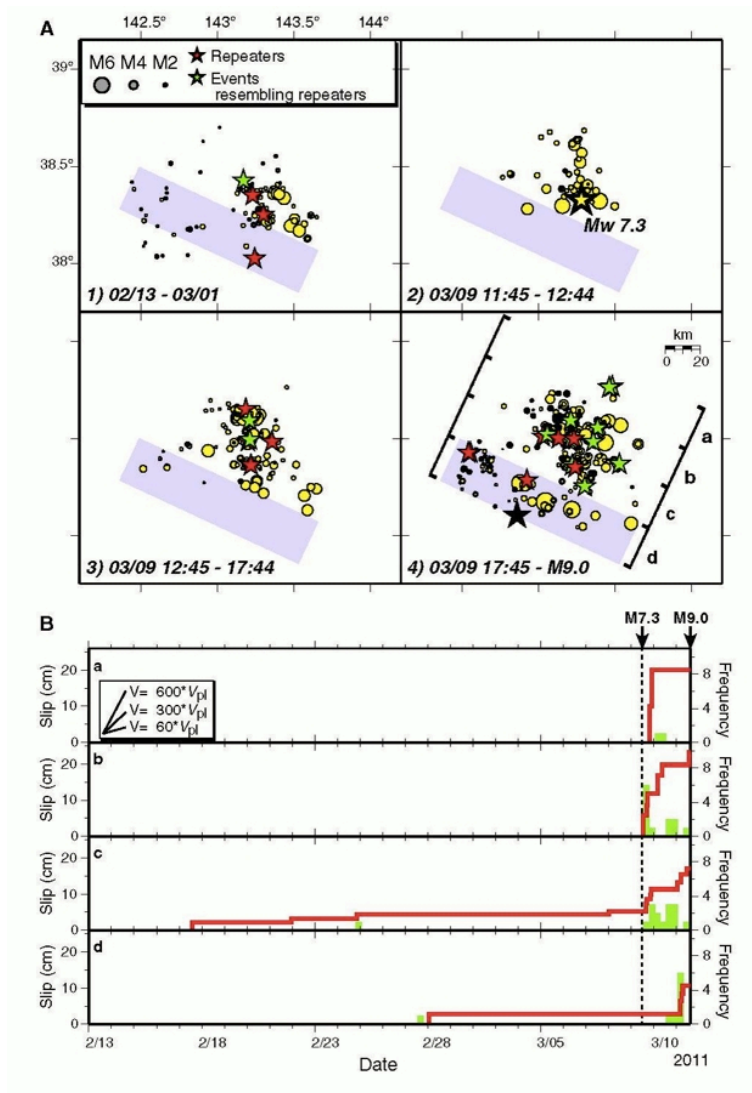


図7 2度のスロースリップ伝播を示す時空間変化

(A) 検出された地震の震源分布。赤，緑，黒，黄色の星印はそれぞれ，気象庁震源に記載された小繰り返し地震，新たに検出した小繰り返し地震と類似したイベント，東北地方太平洋沖地震の破壊開始点，最大前震を示す。紫色の枠は，地震活動移動領域である。(B) 図Aの4領域における準静的すべりの時間変化(赤線)。小繰り返し地震と類似したイベントの発生頻度を緑色の棒グラフで示す。

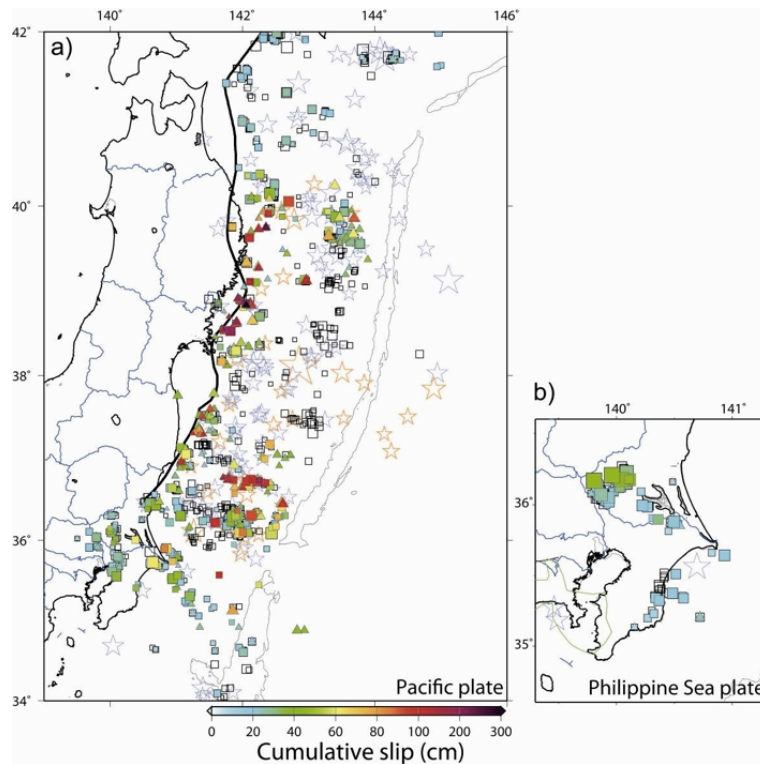


図8 平成23年東北地方太平洋沖地震発生後小繰り返し地震の発生状況とその積算すべり
 a) 太平洋プレート。b) フィリピン海プレート。定期的に発生する小繰り返し地震群を四角，バースト型地震群を三角で示す。青，橙色の星印はそれぞれ，東北地方太平洋沖地震の前後に発生した M6.5 以上の地震を示す（2011 年末まで）。

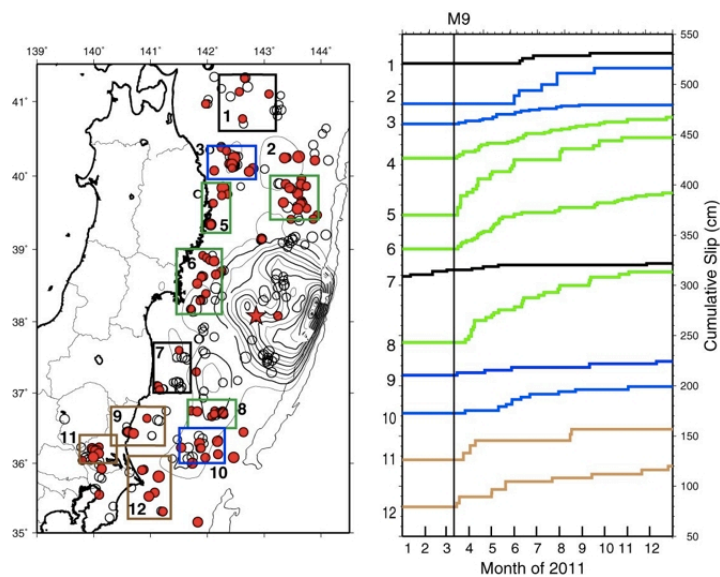


図9 M4以上の繰り返し地震により推定した2011年東北地方太平洋沖地震後の余効すべりの時空間変化 (Uchida et al., 2012, in prep.)
 左図の矩形領域1-12内の繰り返し地震グループの平均の積算すべりを右図で示した。左図の丸は繰り返し地震グループの位置でそのうち赤色は2011年東北地方太平洋沖地震以降に活動したグループ，コンターはIinuma et al., 2011による地震時すべりの分布，赤星は本震の震央 (Uchida et al., 2012, in prep.)。