

## 平成23年度年次報告

課題番号：9102

(1) 実施機関名：

東北大学大学院理学研究科・東京大学地震研究所・京都大学大学院理学研究科・筑波大学・弘前大学・名古屋大学

(2) 研究課題名：

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震に関する緊急研究  
サブテーマ1（巨大地震発生過程の調査）

(3) 最も関連の深い建議の項目：

—

(4) 現行計画において関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

- (1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象  
オ. 地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

(5) 本課題の5か年の到達目標：

—

(6) 本課題の計画の概要：

2011年東北地方太平洋沖地震前後でのプレート境界に関する挙動の理解を深めるため、既存観測網のデータに基づき、今回の地震の2日前(3/9)に発生したM7.3の三陸沖の地震に伴う地震活動や過去の活動、さらには余震等の活動パターン変化、b値、応力降下量、相似地震に基づくすべり量推定など、様々な特徴を抽出する。

余効変動の時間発展の調査および隣接領域での大地震発生の調査を目的として、今回の地震の震源域の北部および南部の太平洋沿岸に、GEONETを補間する形でGPS観測点を約20点設置することにより、急速に変化する地殻変動パターンを詳細に得るとともに、余効すべり、粘性緩和、プレート間カップリングの影響を評価し、数値シミュレーションと併せて近未来の地殻変動予測を行う。さらに、島弧に沿ったプレートカップリング域の深さ分布の変化に着目し、プレートカップリング域の最深部に近い沿岸域の既設観測点約10点において高サンプリング地震観測を実施し、小地震の震源パラメータを推定するとともに、地震活動やプレート構造の空間変化との関係を明らかにする。

破壊域が停止した原因や今後の破壊の進展の可能性を明らかにするため、震源域の南北両端付近の岩手県北部及び茨城・千葉県において広帯域地震計を約20点設置し、レシーバ関数、干渉法解析、地震波減衰構造の推定、S波スプリッティング解析等に基づいて、これらの領域における地下構造を明らかにする。さらに、余効すべりの進展に伴って発生することが予想される低周波地震を正確に把握し、今後の地震活動の予測に寄与する。以上の地球物理学的調査による結果を総合し、変動地形学などから得られる長期的な地殻変動との比較から、今回の地震が大規模な連動型へと発展した経緯を明らかにする。

(7) 平成23年度成果の概要：

1. 本震の発生過程

1-1：陸上GPS観測による地震時すべり分布—宮城県沖地震との比較

2011年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり分布を、GPS観測から得られた地震時変位を基に逆解析手法を用いて求めた（図1）。主たる破壊域はプレート境界深さ30kmより浅い、大陸地殻が沈み込むプレートと接している領域にあり、2003年の福島県沖の地震や1981年の宮城県沖の地震の破壊域を包含する。一方、それよりも深い、大陸側のマントルと沈み込むプレートとが接しているところでは、これまで1978年宮城県沖地震のアスペリティ周

辺にのみ大きなすべりが求まっており、近々発生すると考えられていた宮城県沖地震の想定震源域は、2011年東北地方太平洋沖地震に際して破壊されたと考えられる。とはいえ、想定宮城県沖地震の規模（M7.5クラス）に比して、推定されたすべり量（10m以上）は有意に大きく、これまで繰り返し発生していた宮城県沖地震が、地震間に蓄積された歪をすべて解放していなかった可能性がある。（Iinuma et al., 2011）

#### 1-2：陸上GPS観測による地震時すべり分布—広域の地震間固着域との比較

Mw9.0東北地方太平洋沖地震のGPS変位データから地震時すべり分布の推定を行ない、2つのピークを持つすべり分布が、Hashimoto et al. (2009)が推定した宮城沖・福島沖の地震間固着域と一致することを明らかにした（Hashimoto et al., 2012）。M7-8クラスとM9クラスの地震発生領域が重なることは、アスペリティの階層的強度構造を示唆する。

#### 1-3：遠地地震波形インバージョンによる震源過程

2011年東北地方太平洋沖地震の震源過程を、グリーン関数の不確定性を考慮した波形インバージョンを用いて求めた（図2）。その結果、海溝付近で50 m以上の大きな断層滑りが得られ、かつ、その領域で、90秒近くも滑り続けていることが明らかになった。大きな断層滑りが長時間継続していることから、摩擦熱等による間隙水圧の上昇など極端な強度弱화가発生し、系の弾性歪みがほぼ解放されたと考えられる。

#### 1-4：応力テンソルインバージョンによる応力変化

防災科研F-netのCMT解を用い、2011年東北地方太平洋沖地震震源域周辺での応力場の時間変化を推定した。得られた結果から、地震後に $\sigma_1$ 軸がプレート境界により垂直に近づくセンスとなっていることがわかった。このことは、応力場がほぼ解放されたことにより説明することができる。（Hasegawa et al., 2011）

### 2. 本震にいたる過程

#### 2-1：陸上GPS観測による、2011年3月9日に発生した三陸沖地震（M7.3）の地震時変動および余効変動

2011年3月9日に発生した三陸沖地震（M7.3）の地震時変動およびそれに引き続く余効変動を陸上GPS観測によって捉えた（図3）。陸上GPS、海底水圧計等のデータから推定された地震時すべり分布は震源の深部延長ですべり量が最大となる結果となった。陸上GPSでは3月9日地震後の余効変動が明瞭に捉えられ、その変位の方向は地震時の変位の方向よりもわずかに南に振れ、余効すべりが地震時すべりの南側で発生した可能性を示唆する。

#### 2-2：東北地方太平洋沖地震前およそ1ヶ月間の地震活動

波形の相互相関解析に基づいて、東北地方太平洋沖地震前のおよそ1ヶ月間に震源域周辺で発生した地震活動に関する新たなカタログを構築した。その結果、本震の破壊開始点へ向かう震源移動がほぼ同じ領域で二度にわたって起きており、いずれも小繰り返し地震を含むことから、ゆっくりすべりの伝播が生じていたことが示された。さらに、2度目のゆっくりすべりの方が伝播速度、すべり量、すべり速度はいずれも増加しており、より効果的に、本震の破壊開始点へ応力を集中させたと考えられる。（Kato et al., 2012）

### 3. 本震の後の過程

#### 3-1：震源域北部における広帯域地震観測

震源域の北端付近の岩手県北部において広帯域地震計を約20点設置した。特に震源域から北部への余効すべりの進展に伴いプレート境界近傍で発生することが予想される低周波地震のモニタリングを目的として、連続波形記録を準リアルタイムで監視するシステムを構築した。開発したシステムにより異なる2つの帯域のフィルタ処理を施した任意の1時間分の連続波形記録をWeb上で監視できるようになった。今後開発したシステムおよび海底地震計記録を併せて用いてプレート境界近傍の低周波地震の検知を目指す。

#### 3-2：震源域南部における広帯域地震観測

茨城県内に5か所の広帯域地震計を新たに設置したとともに、房総半島に既設の広帯域地震計の維持強化を実施し、低周波イベント等のモニタリングを開始した。その結果、茨城・房総沖で数個の低周波イベントが検出され、いずれも日本海溝近傍に限定される。房総沖では5月以降で唯一のM4以上の低周波イベントが、10月下旬のスロースリップ期間中に発生していた。また、茨城沖では8月25日に、高周波数成分をほとんど含まない超低周波地震が検出された。

### 3-3：陸域における高サンプリング地震観測

微小地震の震源スペクトルの調査等に資するため、東北地方太平洋沖地震の余震域に近い太平洋岸の定常観測点8点（青森県～栃木県）において1kHzの高サンプリングによる臨時地震観測を行った。地震計は、ボアホールまたは観測壕に設置された固有周期1Hzの速度計である。観測は現地収録方式で、一部観測点を除き2011年4月から11月まで毎月データ回収を行った。現在、波形の編集を終え、解析の準備に入っている。

## 4. 地震発生サイクル

### 4-1：小繰り返し地震から推定された震源域のプレート間カップリング率

小繰り返し地震から推定された震源域のプレート間カップリング率およびプレート収束速度をもとに、東北地方太平洋沖地震タイプの巨大地震の発生間隔を見積もった（図4）。その結果、260-880年という値が得られた。これは津波堆積物によって推定されている400～800年という再来間隔（地震調査委員会，2011）とほぼ一致する結果である。

### 4-2：測地測量による東北地方太平洋沖地震発生前の内陸のひずみ場の再検討

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）の発生ポテンシャルを正當に評価し損ねた原因の一つに、東北地方では明治以降約100年間の地殻水平歪みで東西短縮歪みが明瞭に見られなかったことがある。この地殻歪み分布では、明治時代に行われた三角測量成果が基準として用いられているが、三角測量は基本的に角度の測定で座標値を決定するため、スケール誤差の懸念がつかまとう。三角測量のスケールは、全国15箇所に設けられた基線場における基線測量で規定されている。基線測量では、三角測量の実施に先立ち、鋼鉄製の基線尺を用いて長さ3～10km程度の基線長を直接測定していた。東北地方には塩野原（山形県新庄市）、鶴児平（青森県七戸町）の2箇所の基線場がある。このうち、国土地理院に保管されている塩野原基線（5127m）の測量結果を調べたところ、4回の測定のばらつきは最大14mm程度であり、測定に起因するスケール誤差は高々2ppm程度に過ぎない。しかし、塩野原基線の測量は1894年の5-6月頃に実施されていたことが判明した。1894年10月22日には、基線から約30km西方で庄内地震（M7.0）が発生している。M7.0に相当する東傾斜の断層を仮定し、基線長の変化を計算すると、断層の傾斜に応じて基線長が50mm程度伸びることが予想され、10ppm程度の測量網のスケールを過小評価していたと思われる。この補正を行うことにより、100年間の地殻歪みにおいて、東北地方に明瞭な東西短縮歪みが現れる可能性がある

### 4-3：シミュレーションによる東北地方太平洋沖地震発生サイクルモデルの構築

東北地方太平洋沖地震サイクルの概念モデルとして階層アスペリティモデル（HAモデル）（Hori and Miyazaki, 2011）と2次元ではあるが強パッチアスペリティモデル（SAモデル）（Kato and Yoshida, 2011）が提唱されている。本研究では、沈み込む太平洋プレートの3次元形状を考慮して、両モデルに基づくシミュレーションを行なった（大谷・他、2011, Ohtani et al., 2011, Ohtani, 2012）（図5）。その結果両モデルとも、宮城沖浅部での大きな地震時すべり、宮城沖・茨城沖でのM7クラスの地震の数十年毎の繰り返し発生、超巨大地震の発生間隔が数百年といった、観測された超巨大地震発生サイクルの特徴を再現することができた。ただし、両モデルでは地震後の振る舞いが大きく異なる。

## 5. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震の2日前の3月9日に発生したM7.3の前震の後の状況についてGPSと地震活動の解析を行った結果、余効すべりが主として南に伝播し、それが本震の発生を促進した可能性が高いことが明らかになった。一方、本震発生に向かって加速するようなプレスリ

ップは見つかっておらず、今後、前震とその余効すべりと、これまで考えてきたようなプレスリップの関係性を解明していく必要がある。

地震時すべりについて、GPS観測データや遠地地震波形から詳細に調べた結果、主破壊域は沖合に位置するものの、1978年宮城県沖地震の震源域まで今回の地震時に滑ったことが明らかになった。今回の地震の震源域が広域になったことを説明するモデルとして、階層アスペリティモデル（HAモデル）と強パッチアスペリティモデル（SAモデル）が提唱されている。どちらも上記の特徴を説明できるものの、本震後に1978年型の地震の発生が前者は抑制され、後者は促進されるという大きな違いがあるため、今後、地震活動や地殻変動をモニタリングすることにより、どちらのモデルがより本質的であるか、すなわち、条件付き安定領域がどのくらい今回の地震において重要な役割を果たしたのかが明らかになると期待される。

GPS観測が開始された1990年代後半から2000年代初頭にかけては、宮城尾県沖から福島県沖にかけては固着の強い時期が続いていた。その固着に強い領域と今回の震源域はほぼ重なるが、2000年代末からは福島県沖の固着は弱まっており、また、100年の測量結果からは固着の強い時期が長期に渡って続いていたようには見えなかった。一方、長期の地震活動と小繰り返し地震から期待されるサイスミックカップリング係数は0.5~0.8程度と推定されている。

このように、用いたデータの種類と期間によってプレート間の固着状況の推定は大きく異なるが、今回、明治の三角測量について系統誤差が生じていた疑いの強いことが明らかになったことにより、全体を説明できる可能性が出てきたことは重要な成果である。M9の地震に周期性が存在しているかどうかも含めて、今後、全体像を解明していくことが重要である。

**(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) :**

- Iinuma et al., Coseismic slip distribution of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake (M9.0) estimated based on GPS data - Was the asperity in Miyagi-oki ruptured?, *Earth, Planets, and Space, Earth Planets Space*, 63, 643-648, 2011.
- Hashimoto, C., Noda, A. & Matsu'ura, M., 2012. M., The Mw 9.0 northeast Japan earthquake: total rupture of a basement asperity, *Geophys. J. Int.*, in press.
- Hasegawa, A., K. Yoshida and T. Okada, Nearly complete stress drop in the 2011 Mw9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth, Planets, and Space, Earth Planets Space*, 63, 703-707, 2011.
- Ohta, Y., D. Inazu, M. Ohzono, R. Hino, M. Mishina, J. Nakajima, Y. Ito, T. Iinuma, T. Sato, and H. Fujimoto, K. Tachibana, T. Demachi, Y. Osada, M. Shinohara, S. Miura, Co- and post-seismic deformation of the M7.3 foreshock triggering the 2011 M9.0 Tohoku Earthquake, AGU Fall Meeting 2011, San Fransisco, Moscone Center, December 5-9, 2011.
- 太田雄策・日野亮太・稲津大祐・大園真子・三品正明・中島淳一・伊藤喜宏・飯沼卓史・佐藤忠弘・田村良明, 藤本博己, 立花憲司, 出町知嗣, 長田幸仁, 篠原雅尚, 三浦哲, 測地データにもとづく3月9日 (M7.3) 地震時すべり分布および地震後余効変動, 日本測地学会第116回講演会, 高山, 高山市民文化会館 小ホール, 2011.
- Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, N. Hirata (2012), Propagation of Slow Slip Leading Up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 335, 705-708, DOI: 10.1126/science.1215141, 2012.
- 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.
- 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, 2011年日本地震学会秋季大会, 静岡, P1-13.
- Ohtani M., K., Hirahara, T., Hori, and M., Hyodo, 2011, Comparative study on quasi-dynamic earthquake cycle models for the 2011 giant Tohoku earthquake, 2011AGU Fall Meeting, SF, U51B-0044, SF.
- Ohtani, M., Large-scale Quasi-dynamic Earthquake Cycle Simulation, 2012, Master Thesis, Graduate School of Science, Kyoto University.

Yagi, Y. & Fukahata, Y., Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute elastic strain release, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L19307, doi:10.1029/2011GL048701, 2011.

**(9) 平成24年度実施計画の概要 :**

次年度以降は、新規課題として研究を継続する予定である。本年度行った臨時観測データの整理・解析を進める。それ以外の研究項目についても研究を進める。

**(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :**

東北大学 : 長谷川昭、海野徳仁、松澤暢、内田直希、伊藤喜宏、太田雄策、岡田知己

**他機関との共同研究の有無 : 有**

東京大学 平田直、小原一成、三浦哲

京都大学 平原和朗

筑波大学 八木勇治

名古屋大学 鷺谷威、山中佳子、橋本千尋

弘前大学 小菅正裕

**(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 : 東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

電話 : 022 - 225 - 1950

e-mail : zisin - yoti@aob.geophys.tohoku.ac.jp

URL : <http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/>

**(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者**

氏名 : 岡田知己

所属 : 東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

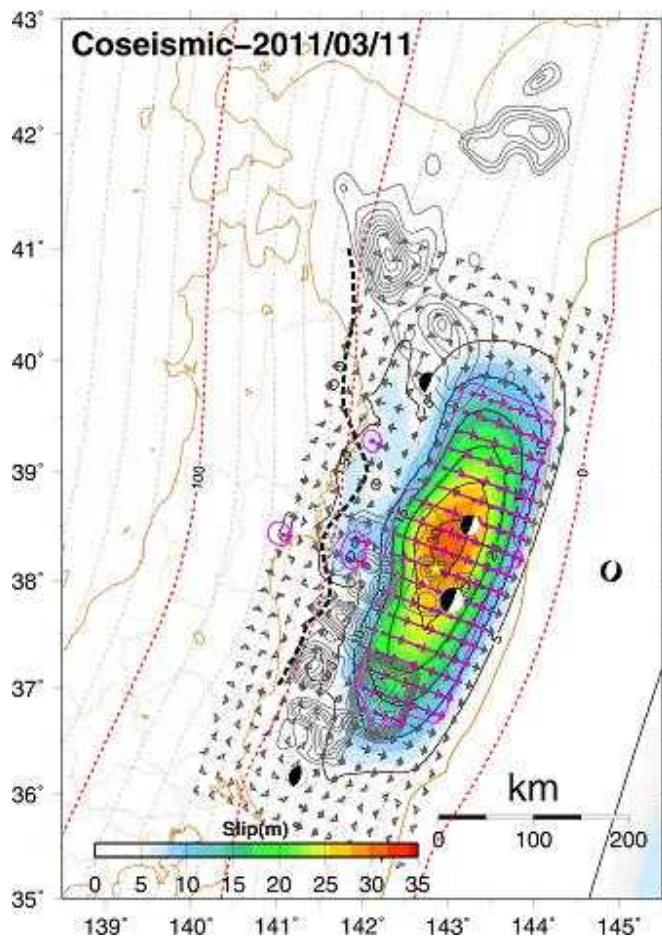


図1 東北大学及び国土地理院のGPS連続観測点で観測された地震時変位から推定された、2011年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり分布。紫の線で囲まれた範囲の、紫の矢印で示されている推定値は推定誤差を上回っている。黄色の星は発震点を、震源球は北から順に、岩手県沖の余震(3/11、Mw7.4)、3月9日の前震(Mw7.3)、宮城県はるか沖の余震(3/11、Mw7.5)、本震(3/11、Mw9.0)、茨城県沖の余震(3/11、Mw7.7)のメカニズム解を示す(いずれも気象庁のもの)。黒の破線はIgarashi et al. (2001, JGR)による低角逆断層型地震の西縁を示す。

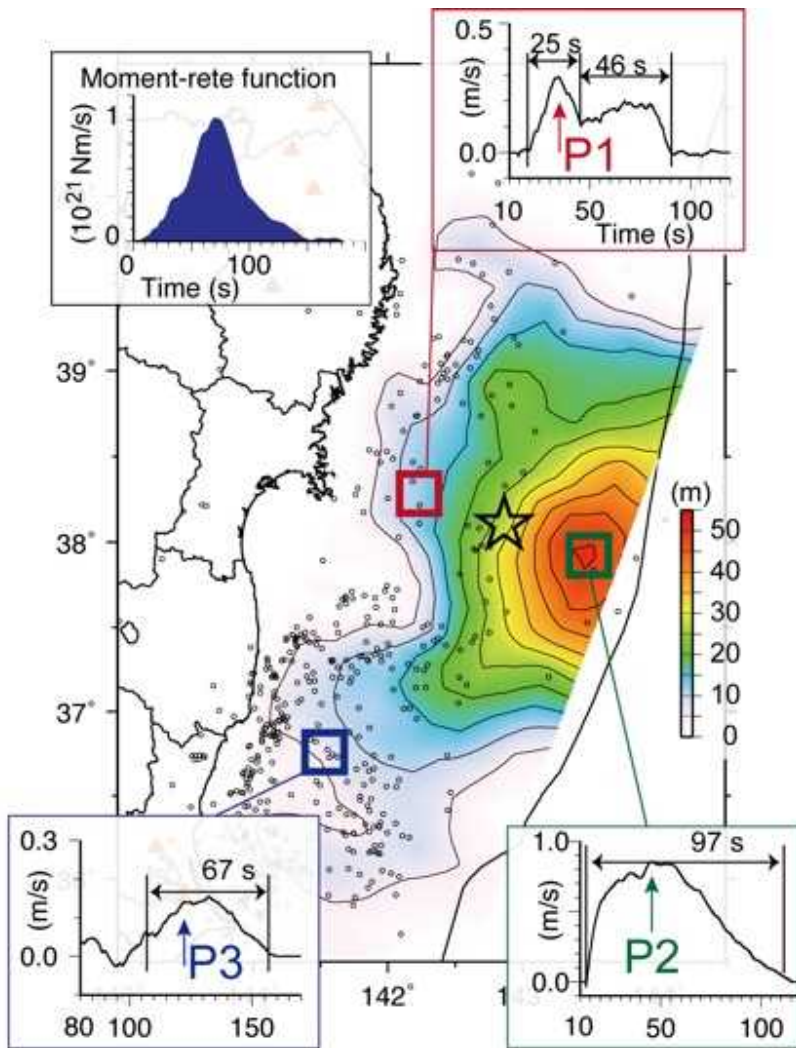


図 2 断層滑り分布、モーメント速度関数、各点の滑り時間関数。星は本震の震源、丸は余震の震源を示す。(Yagi and Fukahata, 2011)

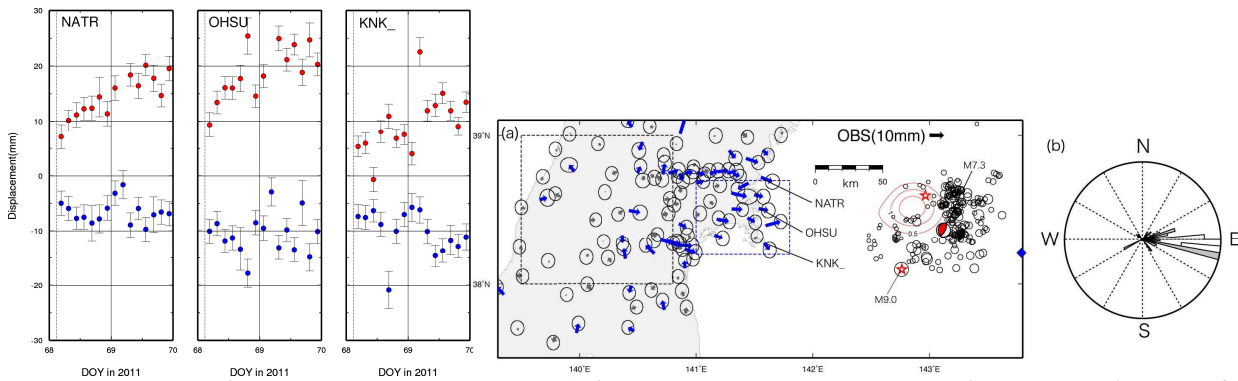


図3 (上図) 沿岸部に設置されている東北大学の2011年3月9日後の3時間毎の地震後余効変動時系列。赤が東西、青が南北成分をそれぞれ示す。赤コンターはGPS、水圧計から推定された2011年3月9日地震時すべり分布。

(下図) (a) 2011年3月9日以降の地震後余効変動の水平変動場。(b) 図(a)の青破線四角で囲まれた領域の変位方向のローズダイアグラム。白抜きのバーが地震時の変位方向を示し、灰色バーが地震後余効変動の変位方向を示す。

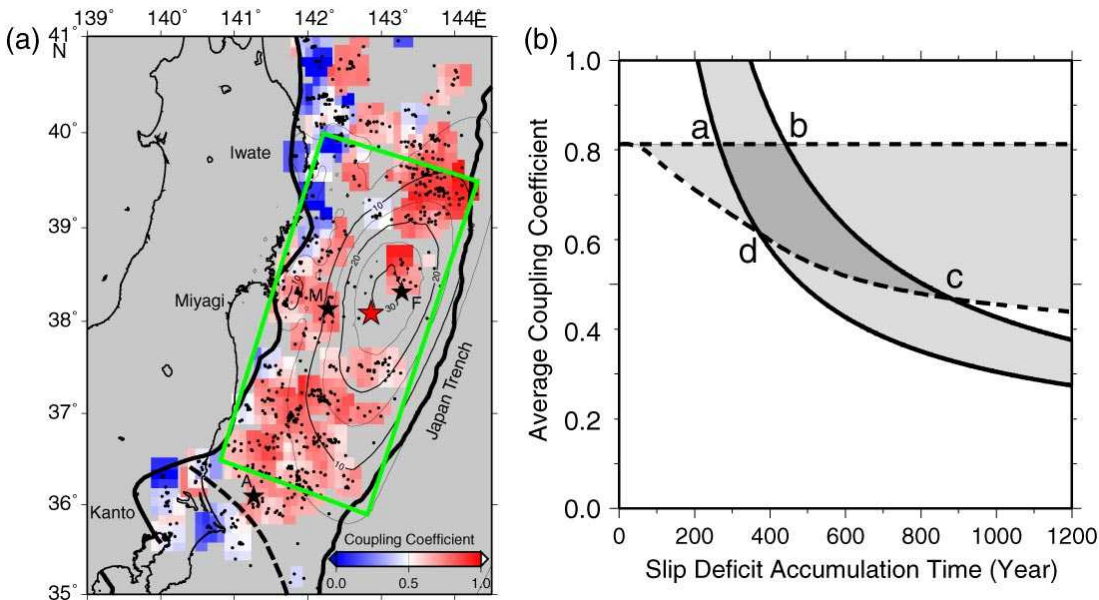


図4 (a) 小繰り返し地震データから推定した東北地方沈み込み帯のプレート間カップリング率の分布と設定した断層面(緑矩形)(Uchida and Matsuzawa, 2011)。コンターは、Iinuma et al., 2011による地震時すべり分布。赤星は本震、黒星Fは前震、黒星Mは2005年宮城県沖地震、黒星Aは最大余震の震央。(b) M9地震の発生間隔の取り得る範囲の推定。実線は、M9地震の余効すべりのモーメントが本震の半分の場合(実線下)と本震と同じ場合(実線上)の平均カップリング率と発生間隔の関係。破線は小繰り返し地震からのカップリング率の推定で、上限は小繰り返し地震がない場所についてカップリング率を1とした場合、下限は地震時すべり量から期待される最小値を仮定した場合。M9以外の地震によるモーメント解放率(過去85年の平均)とプレート収束速度を仮定した。2つの帯が重なる場所(a-b-c-d)にカップリング率、繰り返し間隔が存在すると考えられる。



図 5a

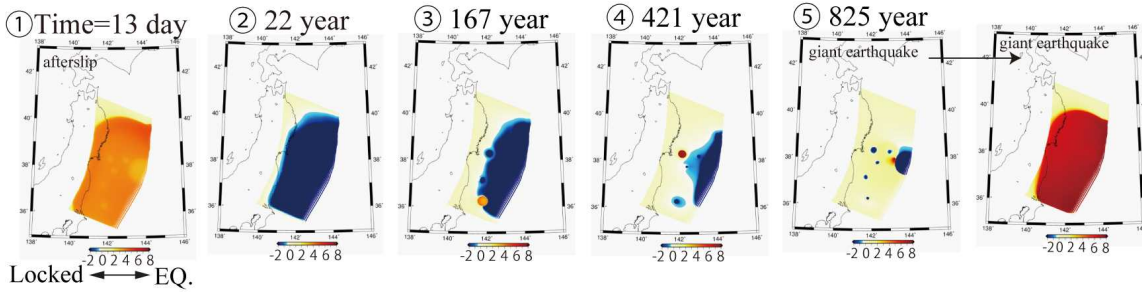


図 5b

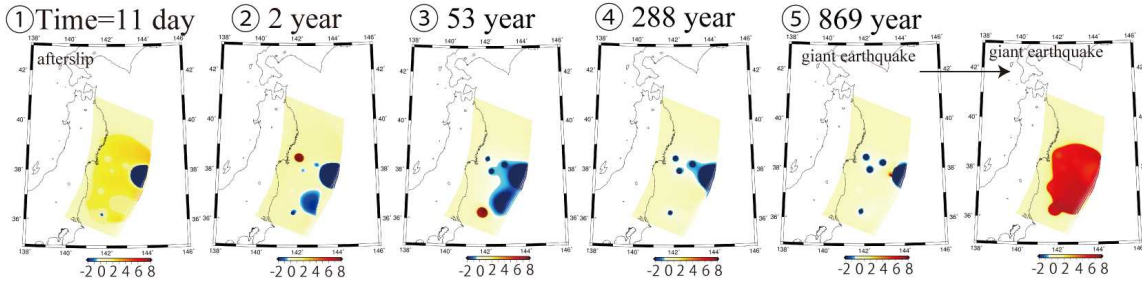


図 5c

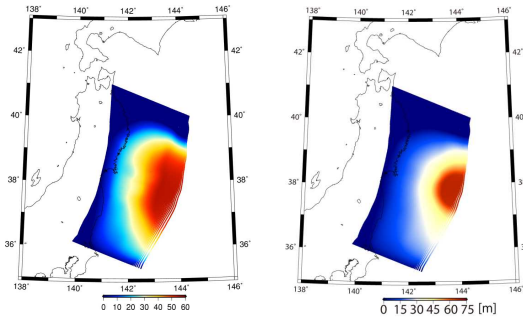


図 5 地震サイクル間におけるすべり速度分布 (a 階層アスペリティ (HA) モデル: b 強パッチアスペリティ (SA) モデル) (赤が地震時すべり、青が固着を表す) と地震時すべり分布 (左図: HA、右図 SA モデル)

両モデルとも、宮城沖浅部に強い固着特性を持つ強パッチ、宮城沖深部に3つ、茨城沖に1つM7クラスのアスペリティを持つ。HAモデルでは、M9震源域全域が条件付き不安定すべり特性を持つのに対し、SAモデルでは安定すべり特性を持つ。そのため超巨大地震の余効すべり後、HAモデルでは全域がサイクルの前半で固着するため宮城沖深部では地震が発生しないが、SAモデルではアスペリティの周りではすべりが発生し応力がかかるのですぐに地震が発生するという違いが見られる。(Ohtani, 2012)