

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

東北地方太平洋沖地震震源域周辺における多項目・高精度モニタリングによる超巨大地震発生過程の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

5. 超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進

(1) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明のための観測研究

ウ. 超巨大地震に誘発された内陸地震や火山活動等の解明

(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

(1) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化

イ. 地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

ア. アスペリティの実体

イ. 非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

(5) 本課題の5か年の到達目標：

東北地方太平洋沖地震は、多項目モニタリングの対象としてきた宮城県沖を震源とした地震であったため、こうした観測データにより詳細な震源像の解明が可能であると期待される。しかし、地震に伴う滑り量が極めて大きく、それを反映して変動量が非常に大きいことから、モデル化に伴う系統誤差の影響が大きくなることによって、震源モデルが十分な精度で推定できていない可能性がある。今回の地震の震源モデルは、超巨大地震発生機構を理解するために最も基本的な知見であり、本研究課題では、地震時に得られた貴重なデータを活用して確度の高い震源モデルを構築することが第一の目的である。またモニタリングデータは、超巨大地震発生に至るまでの過程を捉えたものである。残念ながら、こうしたデータから超巨大地震発生を予測することはできなかったが、事後ではあっても丹念に解析することにより、超巨大地震の発生に先行した特異な現象がなかったかを検証することは、今後の巨大地震発生予測のための戦略を再検討するために重要な知見を提供する。そこで、本研究の第二の目的は、モニタリングデータから東北地方太平洋沖地震発生に至る過程を明らかにすることである。東北地方太平洋沖地震の発生後、顕著な余効変動が観測されている。本学が進めている海底地殻変動観測の結果によれば、日本海溝近傍で数 m におよぶ余効滑りが継続している可能性が示されている。これは陸上 GPS 観測のデータからは検知することが極めて困難である。一方で、余効滑りが広範囲に発生していることも確かであって、海陸にまたがる観測網の構築なくして余効変動の実情を明ら

かにすることはできない。そこで、モニタリング観測の対象を宮城県沖周辺から可能な限り拡大して、余効変動の推移を明らかにすることが第三の目的である。余効滑りの推移やプレート間固着の回復状況は、次の大地震の発生過程とも密接に関連することから、こうした観測は東北地方太平洋沖地震の発生過程の解明だけでなく、近い将来における大地震発生ポテンシャルの評価にも重要な情報を提供する。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

1. 東北地方太平洋沖地震の震源像の解明

東北地方太平洋沖地震の震源像を明らかにすることが、超巨大地震の発生過程を解明する上での出発点である。宮城県沖で始まった破壊がなぜ超巨大地震に成長したのか、なぜ破壊が日本海溝全域にまで拡大しなかったのか、など基本的な問題が未だに未解明である。そこで、地震時に得られた地震・測地学的データ（特に、震源域及びその周辺で取得されたもの）の再解析を通して、この地震の震源モデルの再検討を行う（平成24年度）。

2. 東北地方太平洋沖地震発生に至る過程の詳細解明

・東北地方太平洋沖地震が発生するまでの相似地震・海陸測地データの再解析を行い、サブテーマ1で明らかとなった震源モデルに従うような超巨大地震の発生につながると解釈できるようなプレート間固着・滑り過程があったか検討する（平成24、25年度）

・東北地方太平洋沖地震の発生直前の数ヶ月間に海陸の観測データで捉えられた微小地震活動・地殻変動に着目し、超巨大地震が発生するに至った過程を詳細に明らかにする（平成24年度）。

・過去に宮城県沖で発生したプレート境界型地震に伴う非地震性滑り（主として余効滑り）と、東北地方太平洋沖地震の前震とそれに伴う余効滑りの特徴を比較することにより、超巨大地震発生に至る場合とそうでない場合とで、非地震性滑りの活動に相違が見られるかを検討する（平成25年度）。

・東北地方太平洋沖地震発生前後での大気中ラドン濃度の時間変動に関するデータの収集をすすめて再解析を行うことにより、地震発生に伴う地球科学的異常の検出を試みるとともに、異常が検知できた場合にはその特徴を詳細に明らかにし、その原因となる素過程解明に資する（平成24年度）。

3. 余効滑りの時空間分布とそれに起因する地殻活動状況の総合モニタリング

・陸上観測に基づく小繰り返し地震解析によりプレート間滑り速度の時空間変化を推定する。それと同時に海陸において測地観測（GPS、GPS/A、海底水圧観測など）を行い、それに基づいてプレート間滑り速度の時空間分布を推定する（平成24、25年度）。これには、小繰り返し地震のスケールング則の高度化や、GPSデータを用いた逆解析手法の再検討などを含む。

・地震時滑りが大きかった宮城県沖から余効滑りが進行していると考えられる岩手県沖において海底地震観測を実施し、プレート境界に沿った地震活動の時空間変化を明らかにする。地震時滑りが大きかった領域で低下したプレート境界近傍の地震活動の回復過程、その周囲の余効滑り域との境界域における地震活動の変化などから、断層の強度回復過程の解明を目指す（平成24、25年度）。

・海底に露出した断層の近傍において海底ゆう水量観測を実施し、海底地震・地殻変動観測により検知されるゆっくり滑りイベントの発生と、ゆう水イベントの対応を明らかにすることにより、浅部プレート境界におけるゆっくり滑りイベントへの流体の関与の実態を明らかにする（平成24、25年度）。

・深層地下水変動及び大気中ラドン濃度の観測を継続時、今後発生し得る大地震に先行するあるいは発生に伴う異常現象の検出を試みる。異常が認識された場合、東北地方太平洋沖地震の発生時の変動との共通点・相違点の検討を行い、地球化学的異常の発生過程の理解を図る（平成24、25年度）。そのために、東日本に存在する放射線管理施設のデータを用いてモニタリングするためのネットワークを構築する（平成24年度）。

(7) 平成24年度成果の概要：

約30年間にわたる小繰り返し地震データを用いてプレート境界の非地震性滑りの時空間分布を推定した。プレート境界を2011年東北地方太平洋沖地震時に大きく滑った領域（図1で赤線）、その隣接

領域あるいは最大余震の隣接領域（図1で青色）、更に地震時滑り域から見て遠方（図1で緑色）に分けるとそれぞれ特徴的な滑りパターンが見られた。地震前には、地震時大滑り域では、比較的頻繁にエピソード的な滑りの加速が見られた。一方その周囲では、比較的滑りレートが大きく、定常的な滑りあるいは数年～10年にわたる大地震の余効滑りが見られた。また、地震時滑り域の近のいくつかの領域では2008年頃から滑りの加速が見られた（図中破線楕円）。

2011年3月9日に発生した三陸沖の地震(Mw7.2, 2011年東北地方太平洋沖地震の最大前震)の地震時滑りとそれに引き続く余効滑り分布を陸上GPSデータおよび海底水圧計データに基づいて推定した。その結果、地震時滑り域の浅部延長の南東部で余効滑りが発生していたことが明らかになった（図2）。地震時の最大滑り量は1.7m、地震後余効滑りの最大滑り量は約0.4mであり、余効滑りによって解放されたモーメントはおよそMw 6.8となった。前震の地震時とその余効滑りの分布は相補的であり、更にその後発生した東北地方太平洋沖地震で周辺と比較して滑り量が少ない領域に前震およびその余効変動の滑り分布は位置する。

Ide et al. (2007)は低周波微動から長期的スロースリップまでの種々の継続時間を有するスロー地震について、解放モーメントと継続時間が比例するというスケールリング則が成り立つことを示した。前震の余効滑りはこのスケールリング則から外れ、モーメント解放量に対して継続時間が短い(例えば, Ohta et al. (2012), Munekane et al. (2012))。一方、隣接するプレート境界で発生した1989年、および1992年の三陸沖地震でも同様の特徴が見られており、スケールリング則には合致しない。そこでこれらの三陸沖地震を同列に比較するために、地殻変動連続観測点データにもとづいて余効変動の特徴を抽出した。具体的には、滑り速度・状態依存摩擦構成則に基づく対数関数を余効変動時系列に当てはめ、余効変動の時定数を抽出した。使用したデータは1989年、1992年の地震では東北大学宮古観測点の石英伸縮計のデータを、2011年の地震では金華山観測点の体積ひずみ計のデータをそれぞれ用いた。その結果、1989年、1992年、2011年のいずれの場合でも抽出された時定数は数時間程度(1-5時間)と極めて短いことが分かった（図3）。これは他のプレート境界型地震および内陸地震の時定数と比較をした場合においても特徴的に短い。こうした短い時定数は定性的には滑り速度・状態依存摩擦構成則における σ (a-b)が小さいことで説明が可能であり、プレート境界面の摩擦特性を反映している可能性を示唆する結果となった。

地震・測地学的な観測に基づく研究の他、地球化学的なモニタリングも進めている。福島県立医科大学（福島市）で使用された解析法を用いて、札幌医科大学（札幌市）の通気式電離箱のデータを解析し、2003年十勝沖地震発生後や2011年東北地方太平洋沖地震前の大気中ラドン濃度変動を解析した。札幌医科大学の大気中ラドン濃度に関係する通気式電離箱での測定指示値は、2003年十勝沖地震発生直後の地殻変位と呼応して上昇した。その後通常の年変動に転じたが、2010年末にはラドン濃度は急激に増加し、東北地方太平洋沖地震の本震後に低下したことが明らかとなった。

東北地方太平洋沖地震時から継続して観測が成立しているGJT3の海底GPSサイトにおいて、今年度もキャンペーン観測を実施した。2011年4月、8月、11月の本震発生後およそ半年間に実施した3回の観測らは、東北東に約1.2mに及ぶ余効変動が見られていたが、2012年7月の観測で、変位の方向が変わり、2011年11月の位置と比べて西側へ0.5m弱戻っている結果が得られた（図4）。2011年11月から2012年7月の間にGJT3付近に顕著な地表変位をもたらすと考えられるような大きな地震は発生しておらず、この観測結果が正しければ、これを説明するためには粘弾性緩和などを考慮した、複雑なモデルの構築が必要となる。これは余効変動の実態を理解する上で鍵となる重要な観測事実であるため、その精度の検証も含め、今後も観測を継続し変位の時系列に注視していく。

図5 (a)~(f)は、自己浮上式海底圧力計(OBP)のデータから、潮汐成分と非潮汐海洋変動成分ならびにセンサーの長期ドリフト成分を除去することにより得られた地震後の余効変動時系列である。長期ドリフト成分の推定には、顕著な地殻変動がないと考えられる2011年3月7日までの時系列を用いた。このように余効変動による海底の鉛直変動のレートは時間とともに減少する様子が認められる。OBPのデータは期間が短く、その時定数を精度よく推定することは困難と考えられるので、宮城県沿岸部でのGNSS観測点で観測される余効変動時系列を参考に、時定数を20日に固定して観測時系列

に対数関数をあてはめたところ、全ての OBP データで良い一致がみられる。図 5 (g) は、2011 年 4 月 23 日から同年 12 月 10 日までの OBP 観測、海上保安庁の GPS/A 観測及び国土地理院の GNSS 観測で得られた上下変動の分布図である。なお、海上保安庁の GPS/A 観測結果は、地震後 1 回目の観測から 2011 年 11 月の観測までの上下変動量である。OBP で観測される海域での上下変動はいずれも沈降であり、海溝軸から海岸線に向かって、また観測領域南側に向かって沈降量が大きくなる傾向が見られる。この傾向は、GPS/A 観測による上下変動の大きさと空間変化とよく一致している。

海陸の地殻変動観測データに基づき、2011 年東北地方太平洋沖地震の余効滑り分布を推定した。対象とした期間は 2011 年 4 月 23 日から 12 月 10 日までの約 8 か月である。各観測点における変位時系列データに対し、プレート運動による変位を差し引いてオホーツクプレート固定の変位場とし、さらに期間中に発生した規模の大きな地震及び粘性緩和による変位を除去する操作を行い、得られた変位時系列に時間依存逆解析手法 (Yagi & Kikuchi, 2003) を適用することで、プレート境界面上の滑りの時空間発展を求めた。粘性緩和については VISCO1D (Pollitz, 1997) を使用し、球殻二層構造における地表での変位を計算した。弾性層の厚さは 50km とし、地震時滑り分布は海底地殻変動データも用いて推定されたもの (Iinuma, et al., 2012) を、一様な滑り量を持つ 10 枚の矩形断層によって近似したものをを用いて与えた。粘性層の粘性係数は 1.0×10^{19} Pas, 2.7×10^{18} Pas, 1.0×10^{18} Pas の三通りを仮定し、それぞれに対して計算を行った。なお、 2.7×10^{18} Pas という値は、2008 年岩手・宮城内陸地震の地震後 1.5 年分の GPS 観測データから求めた変位場に対して推定された値であり (Ohzono, et al., 2012), 陸域下での今回の解析期間に対して適用するに十分な根拠を持った値である。最終的に推定された余効滑り分布の妥当性 (主に正断層型の滑りがどれだけ求まるかに着目して評価した) も加味し、本稿ではこの値 (粘性率 2.7×10^{18} Pas) を仮定した場合の結果を採用した。

推定された余効滑りの分布からは、茨城・福島両県沖並びに岩手県沖のプレート境界のごく浅部 (20 km 以浅), すなわち地震時には 50 m を超えるような大きな滑りが生じなかった領域において大きな余効滑りが生じていること、また、1978 年宮城県沖地震のアスペリティ群 (2005 年の宮城県沖の地震及び 2011 年東北地方太平洋沖地震本震によって破壊されたと考えられる) の付近ではほとんど滑っていないことなどが分かった (図 6)。

余効滑り分布は、プレート境界面上発生する小繰り返し地震の、本震発生後の活動の解析からも、地殻変動データとは独立に推定された。本震に伴う地震時滑りが大きかった領域では、小繰り返し地震活動がみられず非地震性滑りが完全に停止したように見えるのに対し、その周辺では、地震時滑りが大きかった領域に近いほど、本震直後から小繰り返し地震活動が活発化しており、立ち上がり鋭い余効滑りが進行しているものと推測できる。このような小繰り返し地震の解析から推定される余効滑りの空間分布パターンは、上述の地殻変動観測データの逆解析から推定された滑り分布と良い一致を示す (図 6)。

2011 年 4 月 11 日にいわき市で発生した地震 (M7) の 10 日後から約 50 日間、余震域内にある深度 1000m 前後の 2 本の孔井を借用して水位変動を臨時観測した。観測された水位変動は体積ひずみにして約 3×10^{-10} /mm に相当する。観測期間中には 27 個の地震 (M3.3~5.5, 震源距離 7.7~105km) に伴う水位変動が観測され、その変動量は、観測事例の 92% に関して、食い違い弾性論による体積ひずみ理論値で説明できる。本震に伴う水位変化は 8m と 10m に達したが、これも本震による静的体積ひずみ変化で説明できる。地震に先立つ 20 分から 3 時間の間に 8mm に満たない水位変動が約 30% の観測事例に認められた。変動は有意であるものの、これが地震発生の前兆変動である証拠は無い。

今年度は、5 つの観測サイト (2 サイトで水位と水温, 1 サイトで水温のみ, 1 サイトでラドンと炭酸ガス濃度, 1 サイトでラドン・炭酸ガス濃度と水温の観測) で通常の地下水変動観測を継続した。

- (8) 平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
- Iinuma, T., R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto, and S. Miura, Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 117, B07409, doi:10.1029/2012JB009186,

2012.

Inazu, D., R. Hino and H. Fujimoto, A global barotropic model driven by synoptic atmospheric disturbances for detecting seafloor vertical displacements from in situ ocean bottom pressure measurements, *Mar. Geophys. Res.*, 33, 127-148, 2012.

太田雄策, 日野亮太, 三品正明, 佐藤忠弘, 立花憲司, 出町知嗣, 三浦 哲, 2011年3月9日三陸沖の地震 (Mw7.2) の余効変動の特徴 -1989年, 1992年岩手県沖の地震の余効変動との比較-, 日本地震学会 2012年度秋季大会, 2012.

Ohta, Y., R. Hino, D. Inazu, M. Ohzono, Y. Ito, M. Mishina, T. Iinuma, J. Nakajima, Y. Osada, K. Suzuki, H. Fujimoto, K. Tachibana, T. Demachi, and S. Miura, Geodetic constraints on afterslip characteristics following the March 9, 2011, Sanriku-oki earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L16304, doi: 10.1029/2012GL052430, 2012.

Suzuki, K. R. Hino, Y. Ito, Y. Yamamoto, S. Suzuki, H. Fujimoto, M. Shinohara, M. Abe, Y. Kawahara, Y. Hasegawa and Y. Kaneda, Seismicity near the hypocenter of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake deduced by using ocean bottom seismographic data, *Earth Planets Space*, in press.

内田 直希・松澤 暢, 2011 東北地方太平洋沖地震震源域の地震活動特性～釜石沖地震との比較を基にして, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉, 幕張メッセ, 2012 年 5 月.

(9) 平成 25 年度実施計画の概要：

1. 東北地方太平洋沖地震の震源像の解明

- ・地震時に得られた地震・測地学的データ（特に、震源域及びその周辺で取得されたもの）の再解析を継続し、この地震の震源モデルの再検討を行う。

2. 東北地方太平洋沖地震発生に至る過程の詳細解明

- ・東北地方太平洋沖地震が発生するまでの相似地震・海陸測地データの再解析を行い、サブテーマ 1 で明らかとなった震源モデルに従うような超巨大地震の発生につながると解釈できるようなプレート間固着・滑り過程があったか検討する

- ・東北地方太平洋沖地震の発生直前の数か月間に海陸の観測データで捉えられた微小地震活動・地殻変動に着目し、超巨大地震が発生するに至った過程を詳細に明らかにする。

- ・過去に宮城県沖で発生したプレート境界型地震に伴う非地震性滑り（主として余効滑り）と、東北地方太平洋沖地震の前震とそれに伴う余効滑りの特徴を比較することにより、超巨大地震発生に至る場合とそうでない場合とで、非地震性滑りの活動に相違が見られるかを検討する。

3. 余効滑りの時空間分布とそれに起因する地殻活動状況の総合モニタリング

- ・GPS/A 観測ならびに海底圧力観測を継続して実施し、余効変動に伴う変位の空間変化を推定する。

- ・陸上観測に基づく小繰り返し地震解析によりプレート間滑り速度の時空間変化を推定する。

- ・地震時滑りが大きかった宮城県沖から余効滑りが進行していると考えられる岩手県沖において海底地震観測を実施し、プレート境界に沿った地震活動度の時空間変化を明らかにする。地震時滑りが大きかった領域で低下したプレート境界近傍の地震活動の回復過程、その周囲の余効滑り域との境界域における地震活動の変化などから、断層の強度回復過程の解明を目指す。

- ・深層地下水変動及び大気中ラドン濃度の観測を継続時、今後発生し得る大地震に先行するあるいは発生に伴う異常現象の検出を試みる。異常が認識された場合、東北地方太平洋沖地震の発生時の変動との共通点・相違点の検討を行い、地球化学的異常の発生過程の理解を図る。

- ・これまでの観測経験から、地下水位観測によって地震の前兆が検知できる必要条件是、マグニチュードが $2.48\log r + 3.5$ 程度より大きいことである。このような条件は、M7 以上の内陸地震の最大余震の際に観測孔井が至近距離にあるときに満足される。このような機会に備え、本震後直ちに観測を開始できる準備を整える。

- ・固定した観測サイトでの通常の地下水観測を継続する。

・東北地方太平洋沖地震を挟んだ長期的地下水変動のデータを解析し、余効滑りなどとの対応を検討する。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

日野亮太・大槻憲四郎・松澤暢・長濱幸裕・木戸元之・内田直希・伊藤喜宏・太田雄策・飯沼卓史・武藤潤

他機関との共同研究の有無：無

(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.gp.tohoku.ac.jp

URL：http://www.aob.gp.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：日野亮太

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

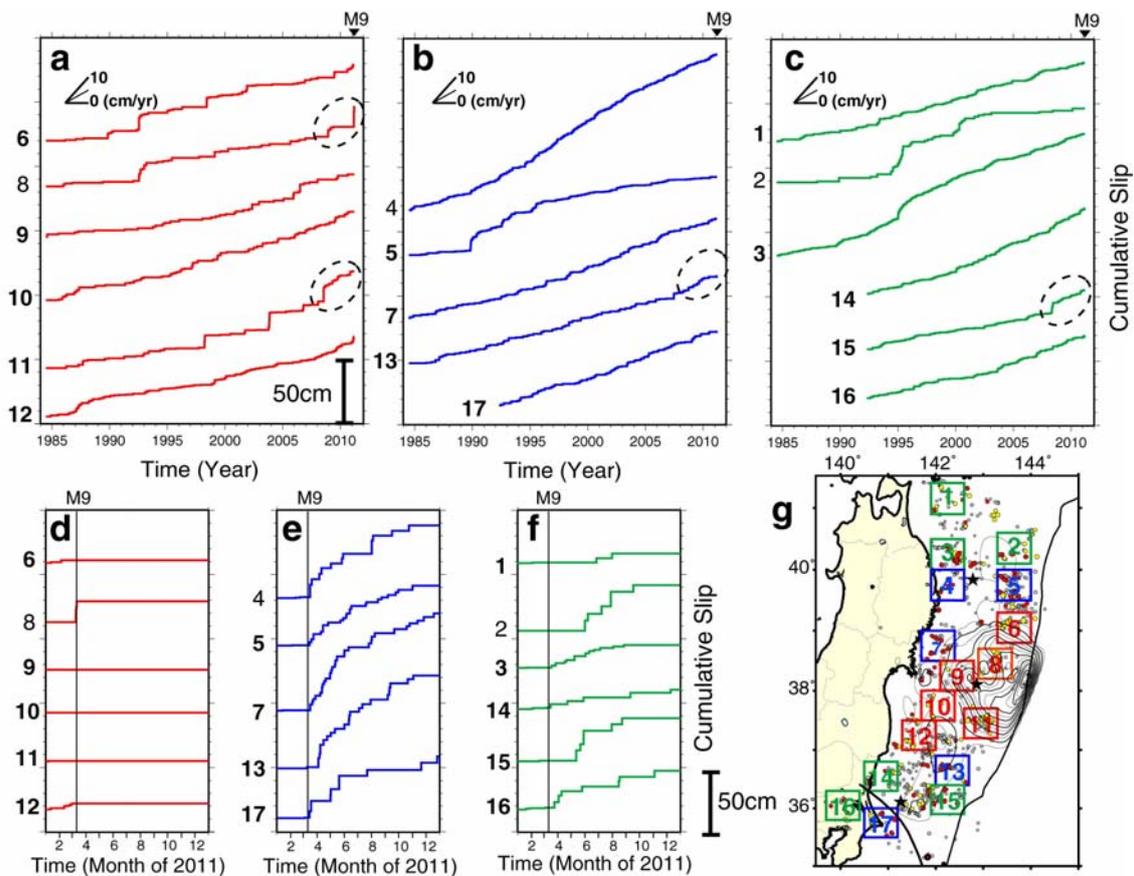


図1 プレート境界の各場所での非地震性滑りの時間発展。

(a-c) 東北地方太平洋沖地震前の滑りの推移。(d-f) 東北地方太平洋沖地震後の滑りの推移。図gは使用した領域を示す。滑りの時間発展は、東北地方太平洋沖地震の滑り域との関係で、大滑り域内(a, d)、その隣接域あるいは最大余震の隣接域(b, e)、さらに離れた場所(c, f)に分けた。

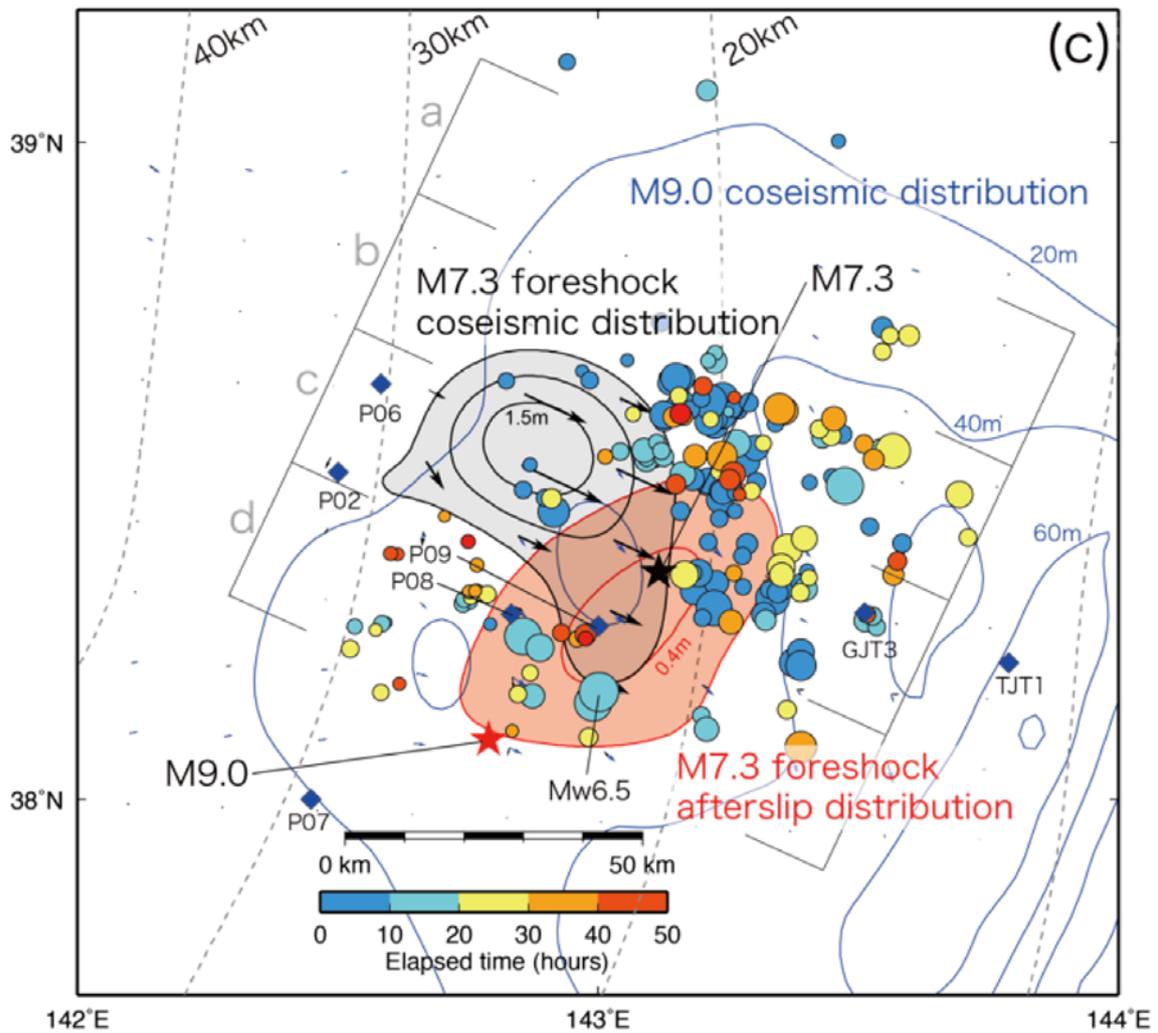


図2 海陸測地データによって推定された2011年3月9日三陸沖地震(前震)の地震時滑り及び余効滑り分布. 2011年東北地方太平洋沖地震までの余震(Suzuki et al., 2012)を前震からの経過時間で色付けしたものを丸印で示す. 青コンターは海陸測地データから推定された2011年東北地方太平洋沖地震の滑り分布(Iinuma et al., 2012).

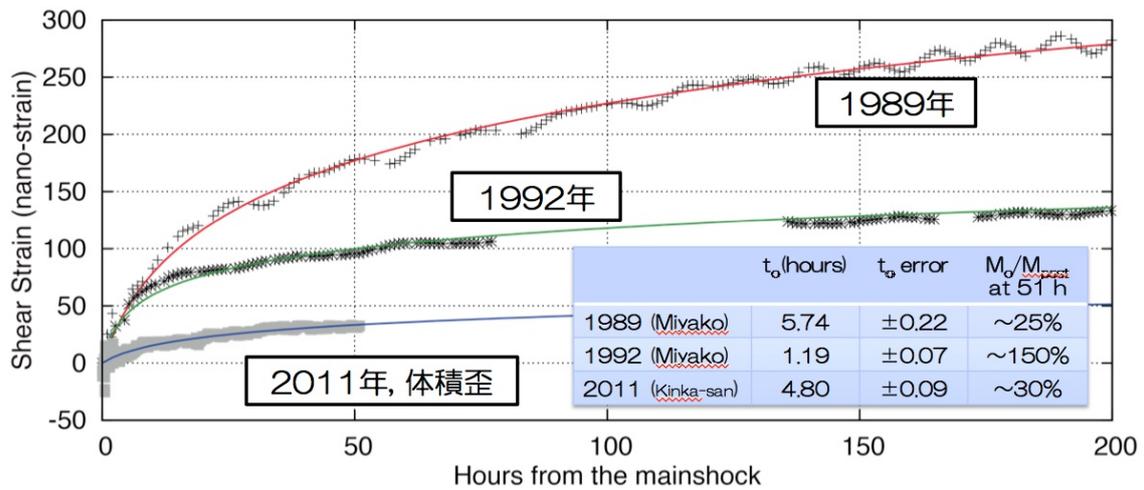


図3 1989年、1992年、2011年の三陸沖地震による宮古観測点(1989、1992年地震)、金華山観測点(2011年地震)における余効変動時系列。

滑り速度・状態依存摩擦構成則にもとづく対数関数を当てはめた場合の時定数とその誤差、及び地震発生後51時間の段階における地震時ステップと余効変動による変動量比。

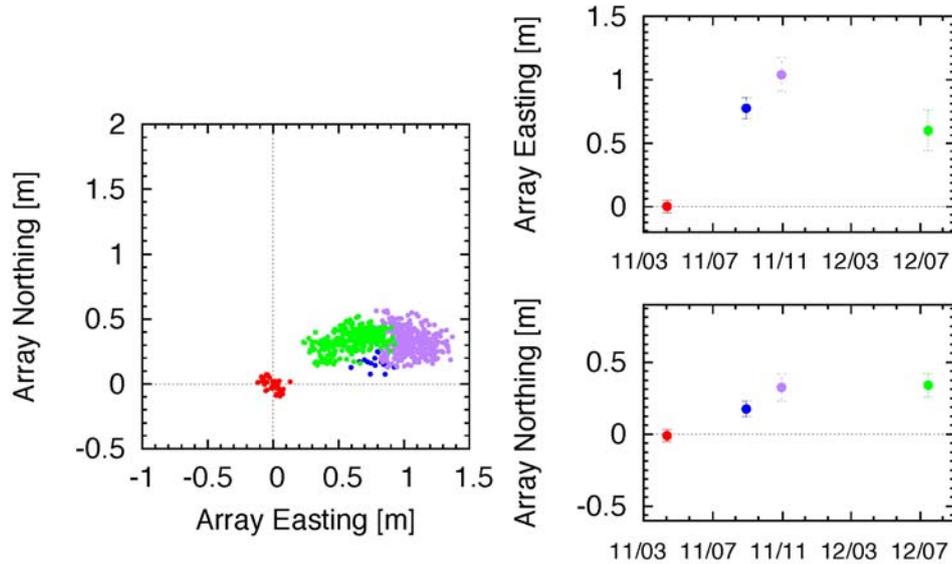


図4 GPS/A 観測点 GJT3 の位置変化 (IRTF2008 基準)。

a)4回の観測での測定位置を水平面に投影したもの。b)東西方向の時系列。c)南北方向の時系列。赤、青、紫、緑の点はそれぞれ、2011年4月、8月、11月、2012年7月の観測結果を示す。

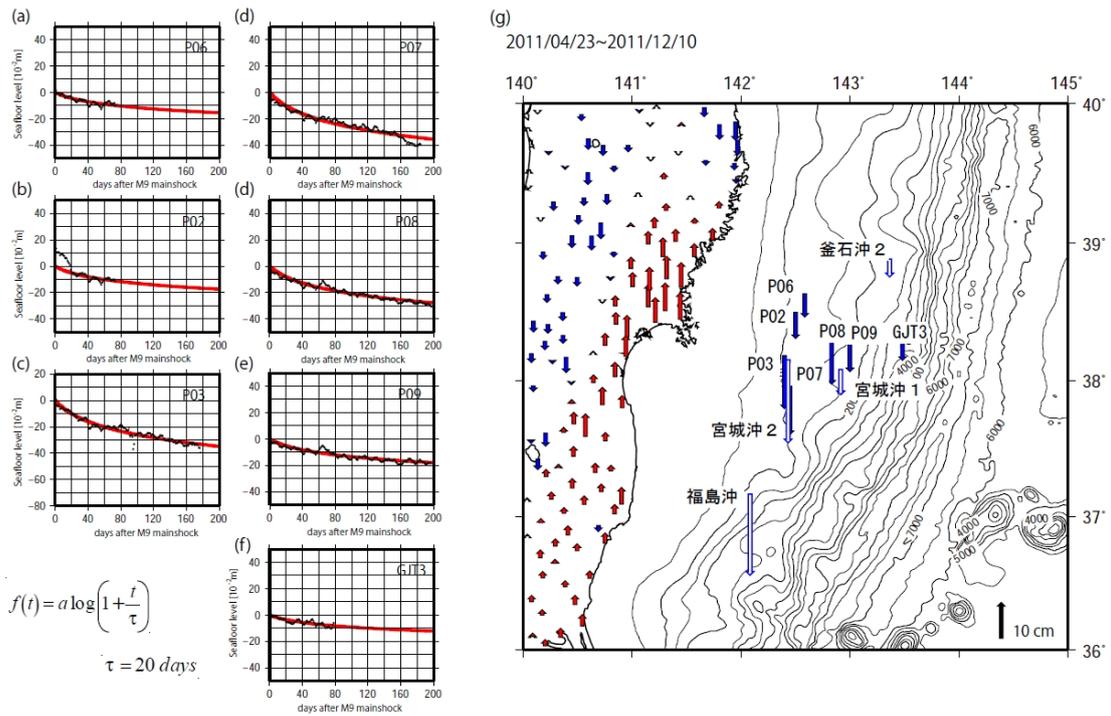


図5 自己浮上式海底圧力計 (OBP) 観測による海底上下変動.

a)~f) OBP でえられた海底上下変動時系列. 黒点は, OBP データの時系列 (1 日値), 赤実線は, 観測時系列に時定数 20 日を仮定して対数関数をあてはめたもの. g) 陸上 GNSS 観測網, OBP 観測及び海上保安庁の GPS/A 観測で得られた上下変動の分布. 隆起・沈降を赤上向き, 青下向きの矢印で示す. GPS/A 観測の結果は白抜きで示す.

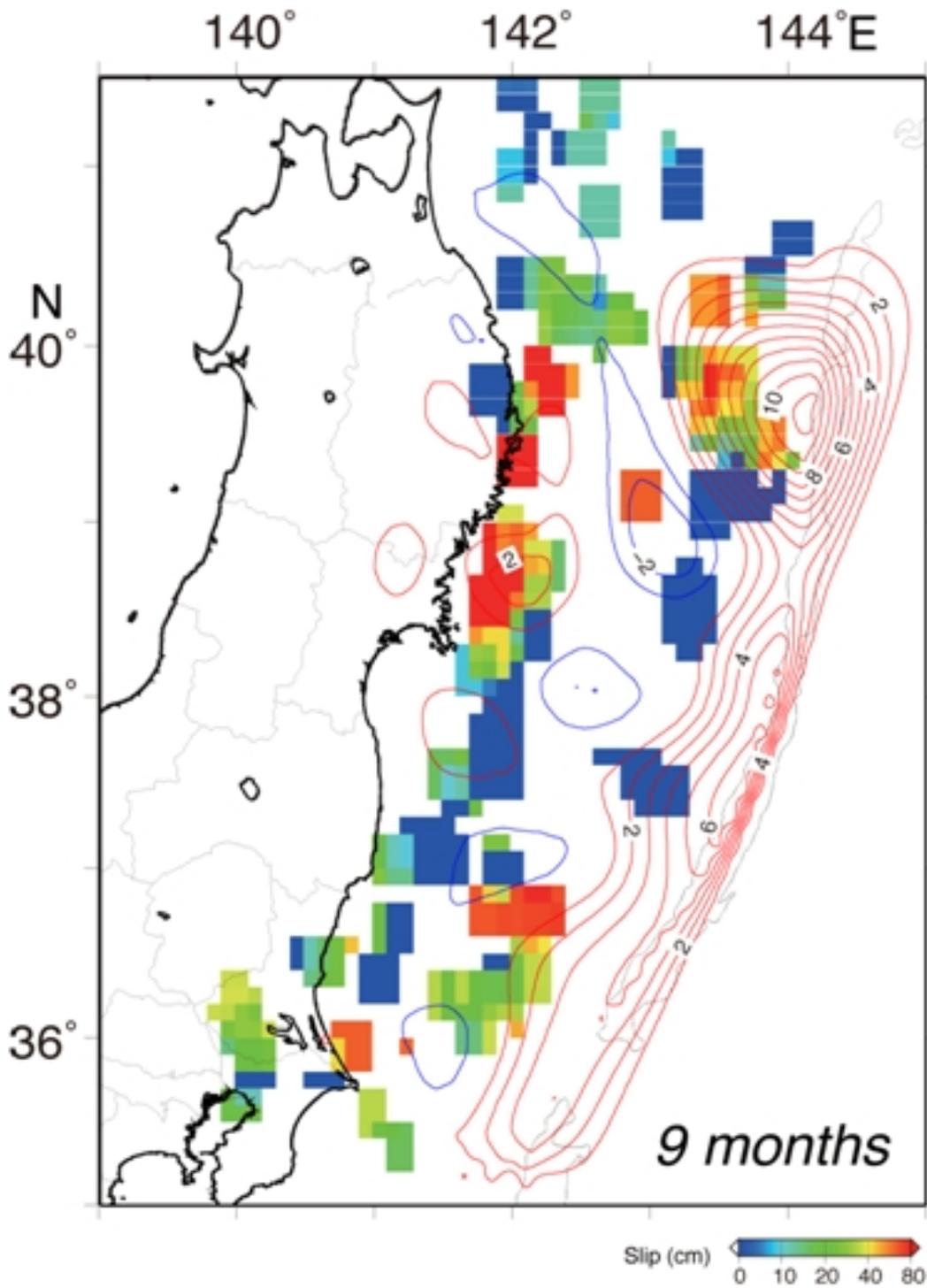


図6 東北地方太平洋沖地震後の余効滑り量の分布。
 海陸の地殻変動観測データの逆解析の結果をコンター、小繰り返し地震解析の結果をカラーパターンで示す。コンター表示では、逆断層滑りを正、正断層滑りを負としている。