

第 191 回 地震予知連絡会



2011 年 6 月 13 日

東北大学大学院理学研究科

海底地震観測による 2011 年東北地方太平洋沖地震(M9.0)とその前震の震源分布

2011年東北地方太平洋沖地震 M9.0 が発生した 3月11日時点で、その震源域内では、東京大学の三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムを含む複数の観測点において、海底地震連続観測が行われていた。ここでは、三陸沖ケーブルシステムの3観測点と宮城県沖に設置されていた自己浮上式海底地震計4観測点のデータを加えて再決定をした、3月9日の前震 (M7.3) とその余震、ならびに3月11日の本震 (M9.0) の震源分布について報告する。

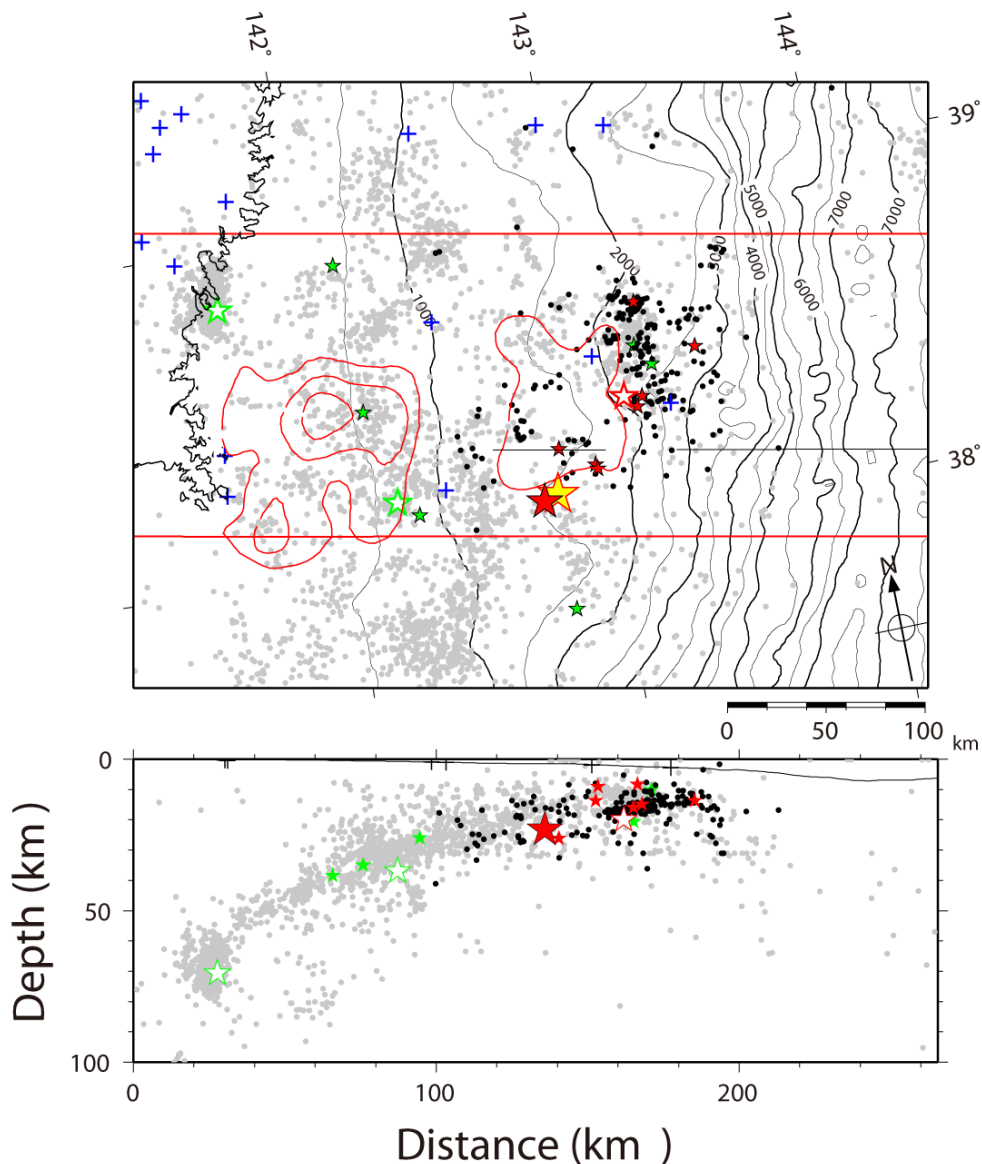


図1. 海底地震計のデータを用いて再決定された震源分布. 赤の大きな星印が 2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の震源. 黄色星は本震の主破壊の開始点. 赤色白抜き星印が同3月9日に発生した前震. 黒丸はと小赤星印は、前震から本震の間に発生した地震 (小赤星印は M6 級のもの). 灰色と緑星印は、2003年～2009年に発生した地震の震源を再決定したもの. 白抜き星印は M7 級, 小星印は M6 級の地震.

前震から本震の発生までの期間に、気象庁の一元化处理により宮城県沖周辺に震源が決定された地震を対象に、P・S波の到達時刻を検測して震源の再決定を行った。また、定常的な地震活動との比較を行うために、2003年から2009年の期間に宮城県沖に設置された海底地震計で観測された地震についても、2011年の地震と同じ走時表を用いた震源決定を行った。前震から本震に至るまでの地震活動を定常的な地震活動と比較すると、前震活動が見られたのは、定常的に活発な地震活動がみられる領域のうち最も海溝側の領域であることがわかる(図1)。この領域では、従来、しばしばM6級の中規模地震を含む群発的な活動が見られていた。前震の活動域には海溝側に明瞭なカットオフがみられ、定常的に地震活動が低調な海溝軸から40 km程度陸側までの領域では、前震活動もみられない。

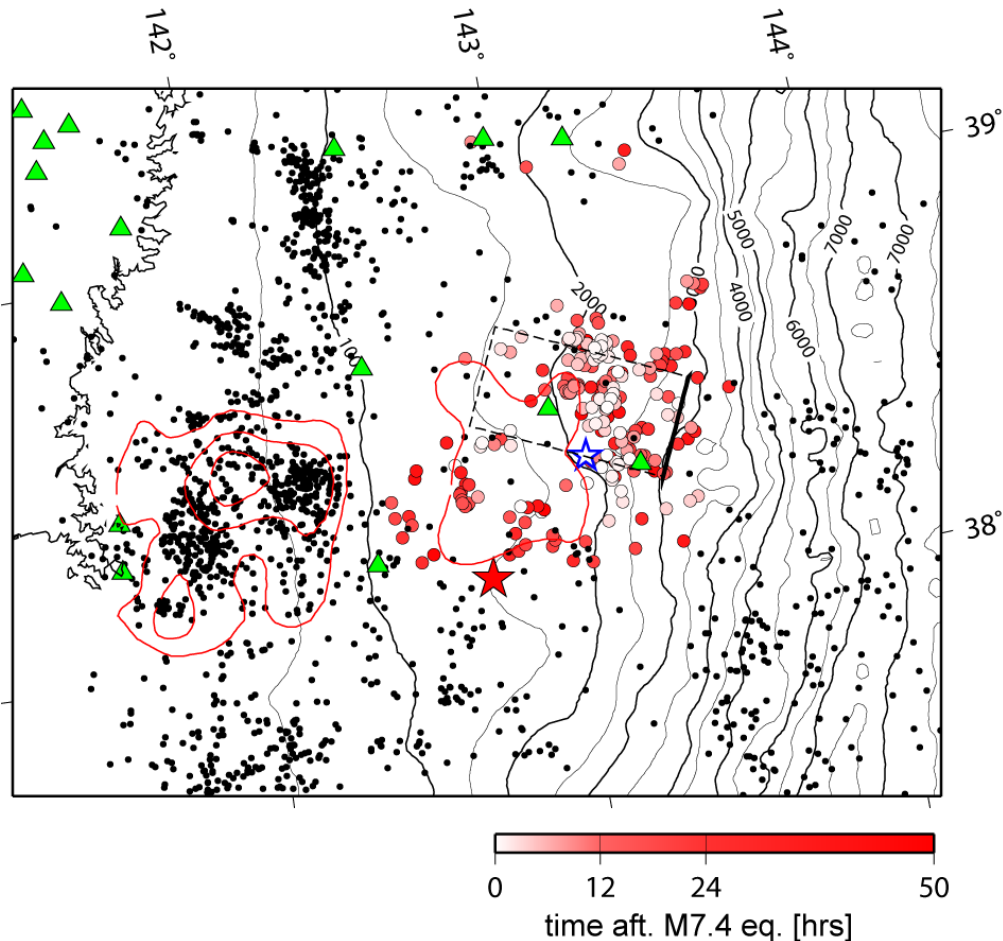


図2. 前震発生後の地震活動の時空間変化. 前震(青星印)からの経過時間をシンボルの色の違いで示す. 赤星印は本震の震源. 黒丸は気象庁一元化处理による、3月11日以降の余震の震央分布. 矩形はOhta et al. [2011]による前震の破壊域.

前震発生後の地震活動は、時間の経過と共に拡大する傾向が見られた。前震直後のおよそ12時間では、前震の破壊域の近傍に集中して活発な地震活動が見られるが、その後周囲に拡大し、3月11日の震源もその拡大域の中に含まれる(図2)。

図3は、震源の深さ分布をこの領域で得られているP波速度構造モデル[Ito et al., 2004]に重ねて示したものである。前震活動は、プレート境界の中でも、沈み込む海洋性地殻と東北日本弧の島弧地殻とが接する部分で発生していることがわかる。本震の震源は、前震の活動域の中では最も島弧側にあり、プレート境界の上盤が島弧地殻から前弧マントルに移り変わる地点に位置する。また、この地点は沈み込む海洋性プレートの傾斜角度が急変する位置でもあり、本震の破壊は地殻構造が大きく変わる地点から始まったことを示す。

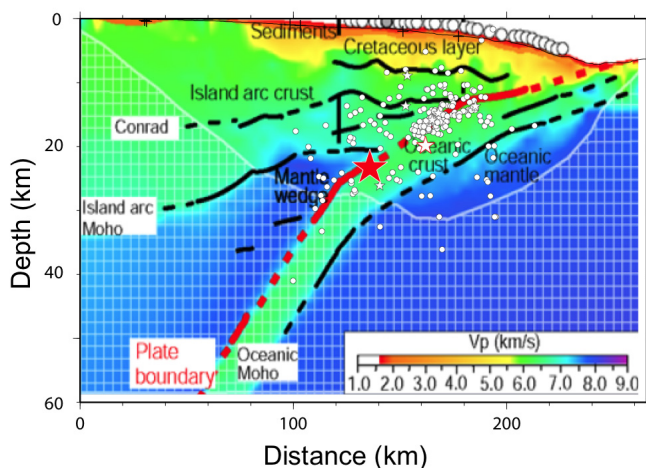


図3. 前震から本震までの地震の震源深さ分布とP波速度構造[Ito et al., 2004]との比較. 赤星印: 本震, 白抜き星印: 前震, 白丸: その他の地震.

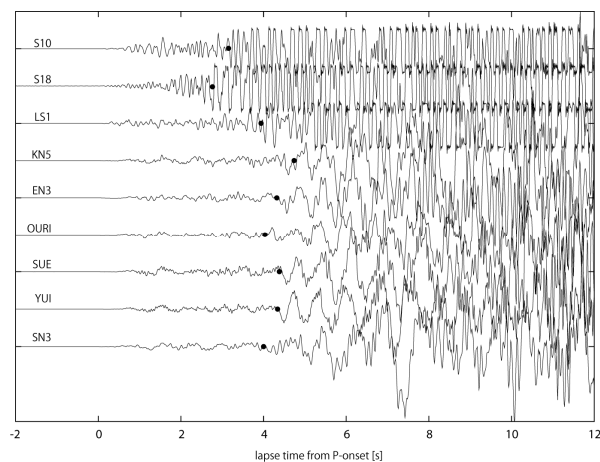


図4. 海底地震計(上の3トレース)と陸上観測点における本震の波形記録. P波初動の到達時刻が0となるように並び替えてある. 黒丸は主破壊相の立ち上がりとして読み取った時刻.

本震の波形に注目すると、P波初動の到達直後の3秒程度は比較的小さな振動が継続した後、急速に振幅が増加する様子が見られる(図4)。海底地震計の波形記録上では、最初の小さな振動部分の継続時間は観測点ごとに異なっており、破壊の開始点と大振幅の地震波を放射した主破壊の開始点の位置が異なることを示す。初動と大振幅部分の到達時刻差を用い、震源と主破壊の開始点との相対的な震央位置の違いと時間差を推定したところ、主破壊は、震源の5.2 km 東側(図1の黄色星)で初期破壊から3.3秒後に開始したことがわかった。

陸上 GPS データにもとづく 2011 年 3 月 9 日 M7.3 の地震の余効変動

陸上 GPS 観測データ（東北大学観測点および国土地理院 GEONET 観測点）にもとづき、3 月 9 日に発生した M7.3 の地震後の余効変動の検出を試みた。3 月 9 日の M7.3 の地震発生から 3 月 10 日 23:59 までの GPS データを 3 時間毎に分割し、Bernese GPS software ver. 5.0 の基線解析で解析した。その結果、海岸線沿いの NATR（名足）、OHSU（大須）、KNK_（金華山）等の水平成分で 10–15mm 程度の西南西向きの変動が検出された。この変動は時間とともに減衰しており（例えば NATR）、M7.3 の地震に伴う余効変動の可能性が高い。余効変動の水平成分の変位方向を見るために M7.3 の地震後の 3 時間と 3 月 10 日の最後の 3 時間の差を取り、さらに変位方向のローズダイアグラムを計算した。地震時（図 1(b) 中の赤色バー）には牡鹿半島付近の観測点はおおむね東向き変位が卓越する。一方、地震後余効変動（図 1(b) 中の青色バー）ではわずかに東南東方向に変化している。これは M7.3 の地震後に余効すべりが南側に進展した可能性を示唆し、余震が M7.3 の地震発生後に南に進展したと整合する。

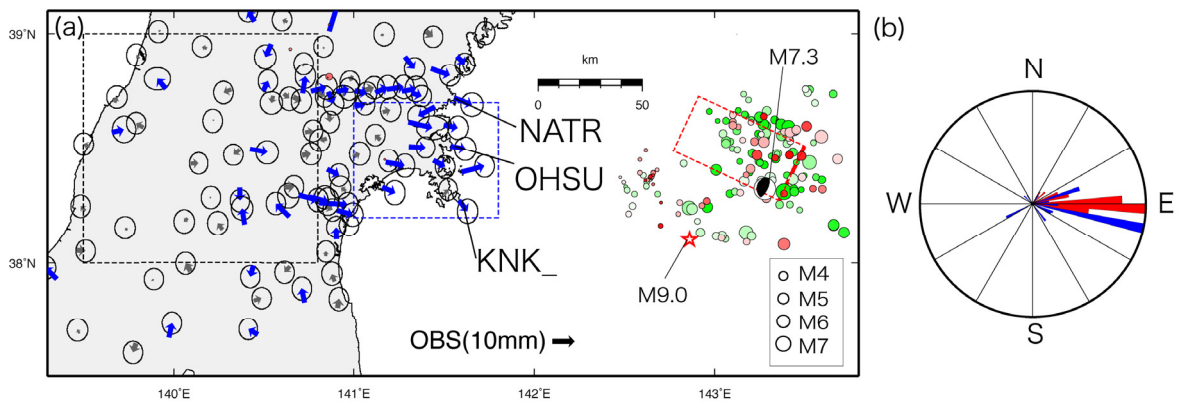


図 1 (a) 3/9 から 3/10 までの地震後余効変動(水平成分)。共通誤差を除去するために図中灰色四角の内部を平均し、それを全ての観測点から差し引いた。図中青破線四角は(b)でローズダイアグラムを計算した範囲。(b) (a)で求めた地震後余効変動の変位方向のローズダイアグラム。赤色バーは地震時、青色バーは地震後変位をそれぞれ示す。

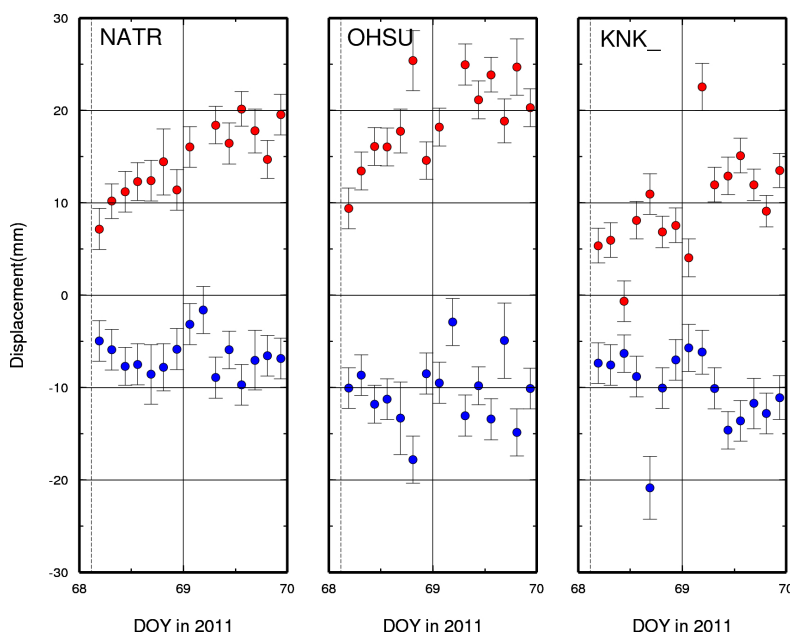


図 2 3/9-3/10 までの地震後余効変動時系列 (3 時間毎)。赤色が東西成分、青色が南北成分をそれぞれ示す。エラーバーは 3σ の信頼区間を示す。NATR, OHSU 両観測点 (場所は図 1(a)を参照) で顕著な地震後変位の減衰が確認できる。

前震及び周辺の海溝型地震の余震活動の特徴について

2011年東北地方太平洋沖地震の2日前にその震央の北東で発生したM7.3の地震（以下前震）は、比較的規模の大きな余震を多く伴った（マグニチュード差1.5以内の地震が7個）。このような地震活動の意味を考えるため、周辺のプレート境界地震の余震活動の特徴を調べた。また、b値の分布、小繰り返し地震の発生状況との比較も行った。

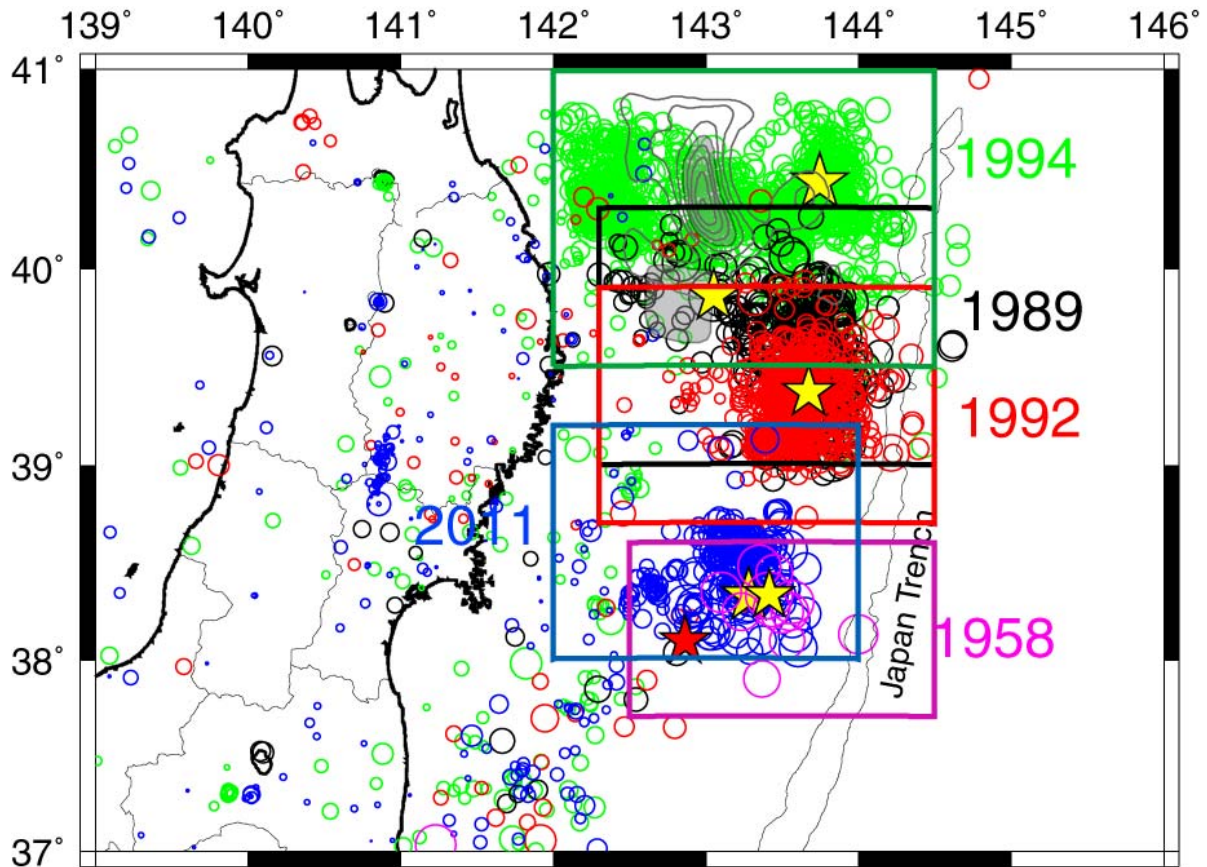


図 1. 調査に用いた地震の本震（黄色星）と余震分布。1994年三陸はるか沖地震（M7.6）および1989年三陸沖の地震（M7.2）については、Yamanaka and Kikuchi (2004)によるアスペリティ（灰色領域）も合わせて示す。震源要素は気象庁による。赤星は2011年東北地方太平洋沖地震の震央。1958年のM6.7の地震の余震域（ピンク）は今回の前震の余震の活動域とほぼ重なっている。1994年と1989年の地震の余震は海岸沿いにまで達し、本震のアスペリティも海溝と海岸の中間付近に存在するのに対し、2011年M7.3、1992年M6.9、1958年M6.7の地震の余震域は海溝側のみに限られている。

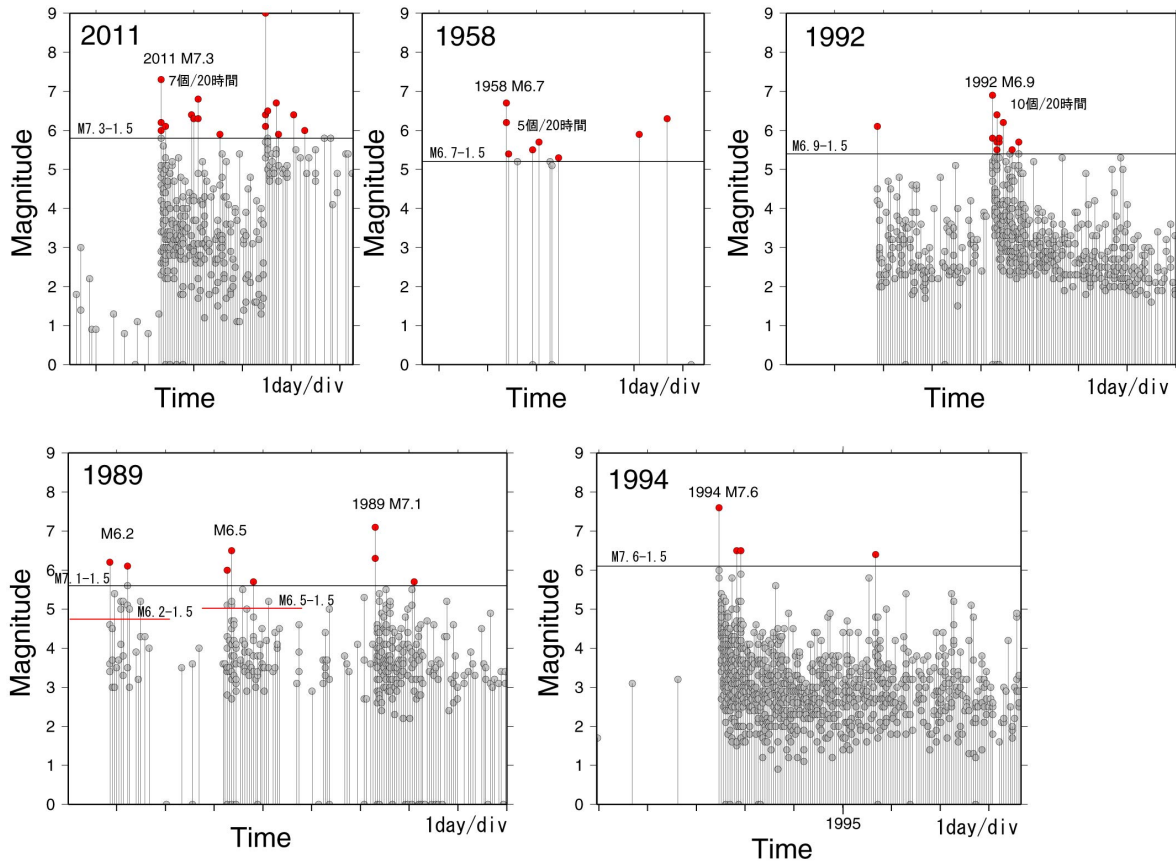


図 2. 5つの地震のM-T図. 解析に用いた範囲は図1に 矩形で示す. 各期間について, 最大地震 (2011年は3月9日のM7.3の地震) に対してマグニチュード差が1.5以内の地震を赤丸で示す. また, 1989年に関しては, 最大地震の前に発生した規模の大きい2つの地震に対してマグニチュードが1.5小さいレベルを赤線で示す. 海溝側のみでの活動であった1958年及び1992年は2011年と同様に本震後に規模の大きい余震が多い (マグニチュード差が1.5以内の地震が1958年は20時間で5個, 1992年は20時間で10個). 一方, アスペリティが陸側にあった1989年及び1994年の地震では, 本震の発生後の大きめの規模の余震は少ない. たたし, 1989年に関して, 活動が海溝沿いに限られていたM6.2とM6.5の地震の後には, 比較的マグニチュード差の小さい地震が多く発生している. これらのことから, 2011年東北地方太平洋沖地震の前震に比較的大きめの余震が多かったのは, 海溝近傍の地震発生場の特徴である可能性が高いと考える.

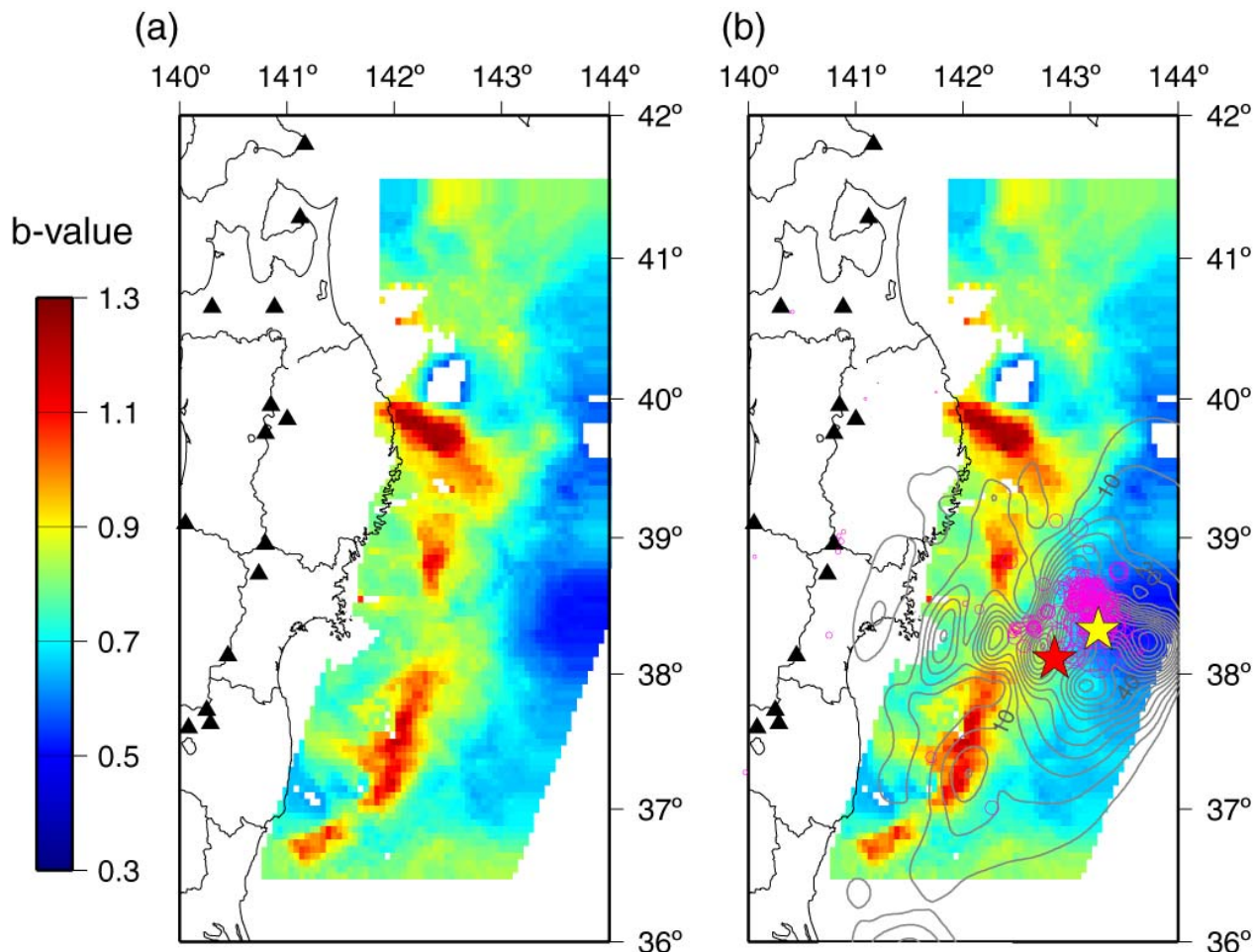


図 3. (a) 太平洋下浅部の地震に関する b 値の分布 (弘瀬, 2001). 東北大学の 1981/1/1 から 2001/10/31 の地震カタログについて、マグニチュードスケールの統一、マグニチュードシフトの補正、人工地震の除去を行ったデータセットを使用した。使用した地震は、 $M2.8$ 以上の 15,588 個。グリッド間隔 0.05 度の各グリッドから最寄りの 300 個の地震を用いて b 値を推定した。(b) 前震の震央 (黄色星)、前震の余震 (ピンク丸)、本震の震央 (赤色星) 及び本震のすべり量分布 (コンター) と b 値との比較。本震すべり量分布は、飯沼・他 (190 回地震予知連絡会) によるもの。前震活動域、および本震の大すべり域での b 値は小さい。

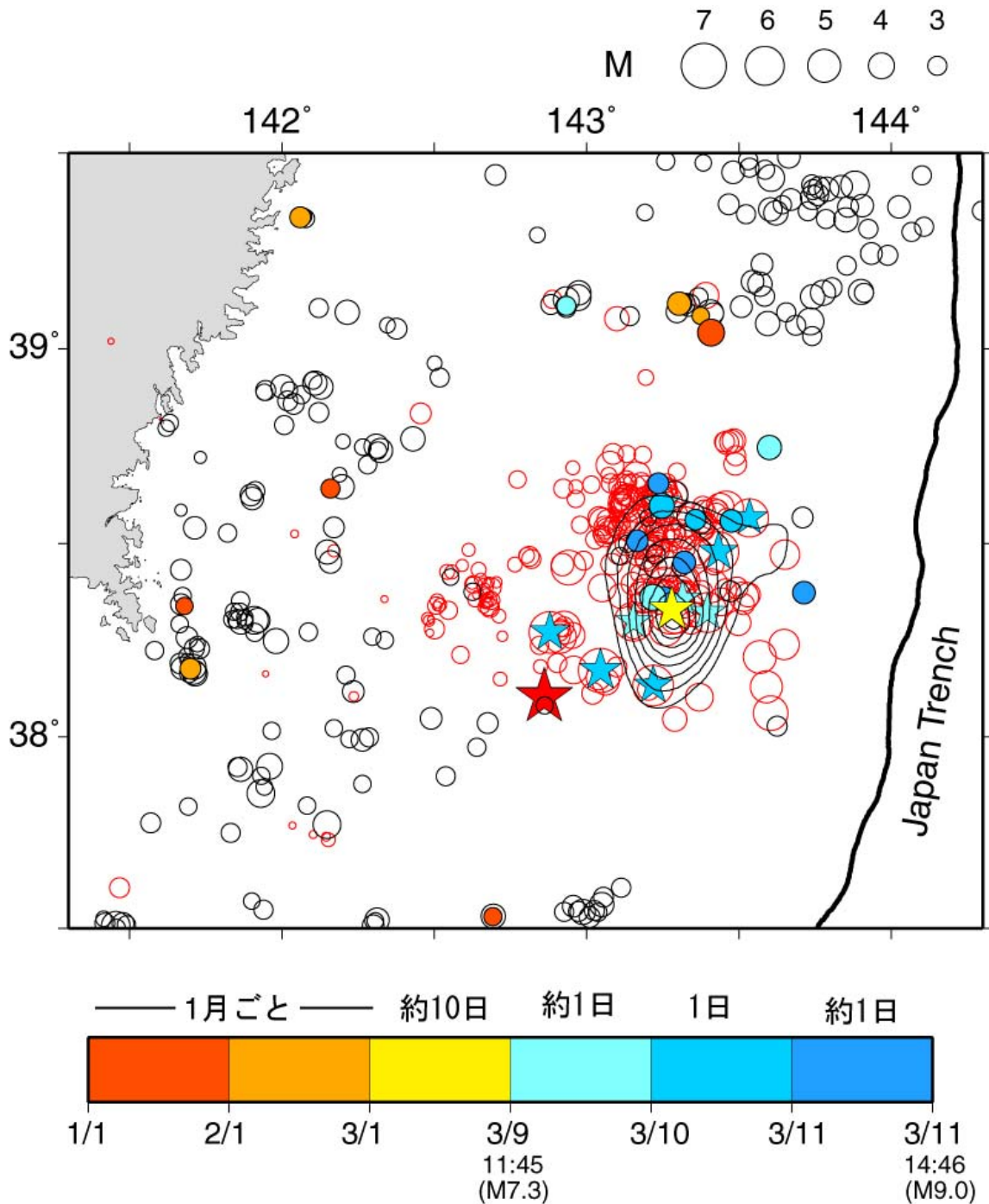


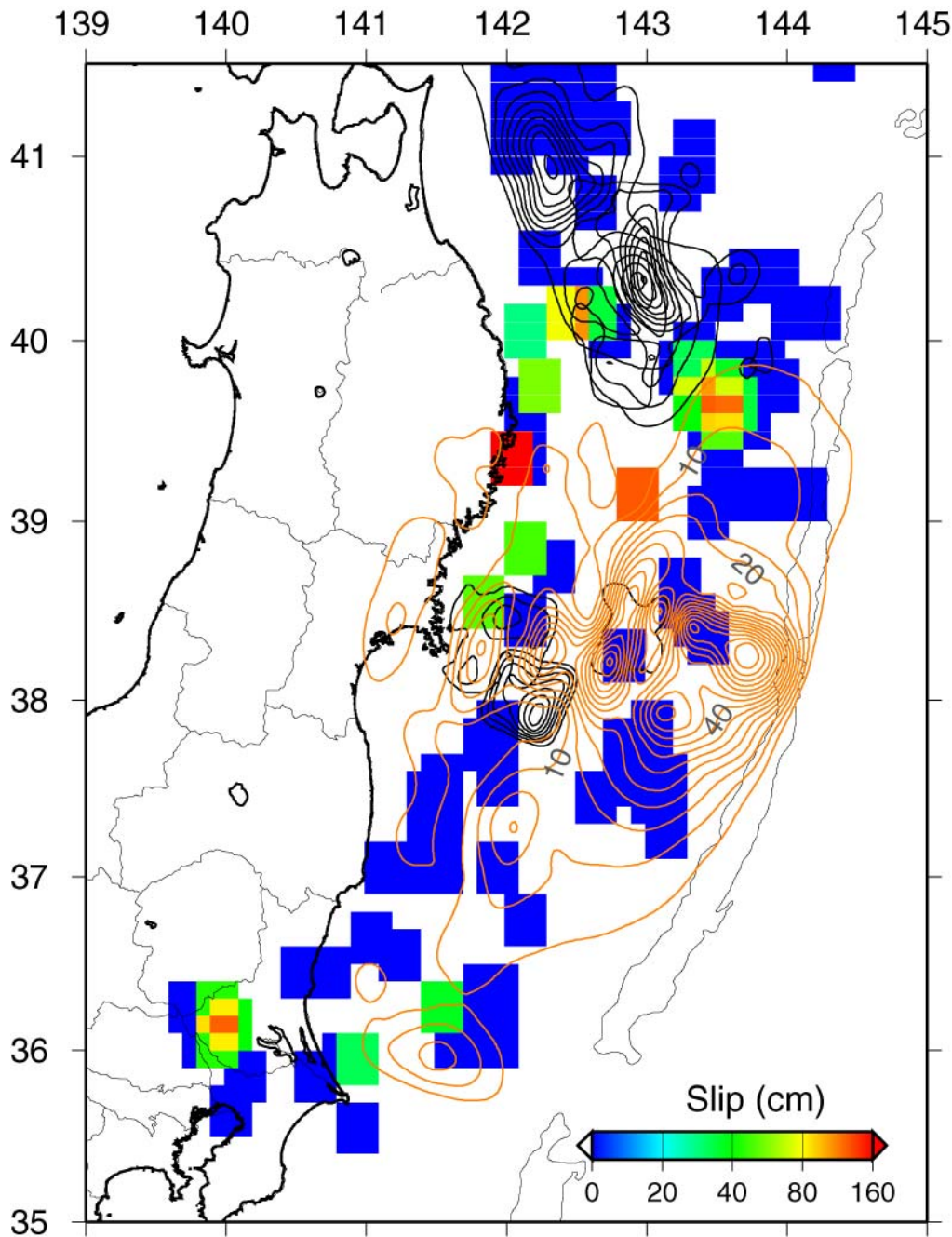
図 4. 前震の余震にみられる小繰り返し地震の分布 (青丸). 赤色丸は、気象庁によるすべての余震 (2011/3/9 11:45-2011/3/11/14:45) を示す. 水色の星は前震の余震 (M5.8 以上) を示し、カラースケールは発生時刻を示す. 橙色~黄色の丸は 2011/1/1 から前震までに発生した小繰り返し地震 (カラースケールは発生時刻を示す), 白色の丸は、2011/1/1 から 2011/3/11 14:46 に活動しなかった小繰り返し地震グループ. 黒コンターは山中 (2011, NGY 地震学ノート No. 35) による前震のすべり量分布. 黄色星と赤色星はそれぞれ前震と 2011 年東北地方太平洋沖地震の震央. 余震の中に多くの小繰り返し地震が含まれ、余効すべりが発生していたことを示唆する. 大規模な余効すべりが活発な大きめの余震の原因の可能性がある.

小繰り返し地震から推定された準静的すべりについて

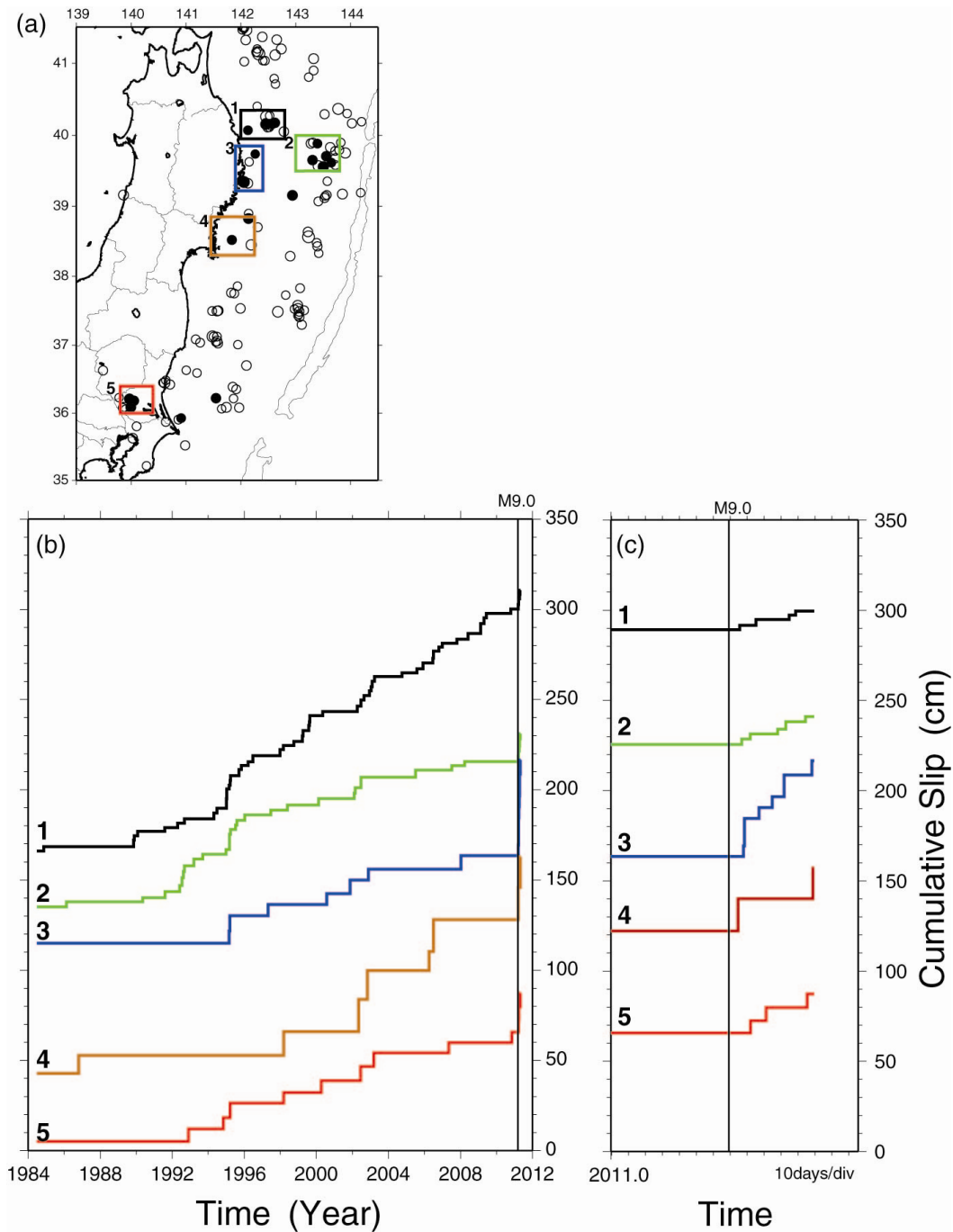
2011年東北地方太平洋沖地震以降の繰り返し地震の活動を調査し、余効すべりの状況について調べた。今回は、地震後大きな余震が頻発しており小規模の地震の解析が難しいため、中規模(M4.3以上)の地震についての結果を報告する。



・ 図1. 1月ごとのM4.3以上の繰り返し地震の震央分布. 年月はそれぞれの図の右下に示す. 1984年~2011年4月30日の地震について内田・他2010による中規模繰り返し地震の抽出基準(2つのペアのうち小さい方の地震のコーナー周波数の1/2~2倍の範囲での平均コヒーレンスが0.8以上)を適用した. 2011年3月以降, 三陸沖や茨城県周辺で多くの繰り返し地震が発生している.



- 図2. 中規模繰り返し地震の積算すべりから推定した余効すべり量分布. 2011年東北地方太平洋沖地震以降4月30日までについて、 $0.3 \times 0.3^\circ$ のグリッドごとに、平均のすべり量を推定した. 気象庁のマグニチュードに基づき、Nadeau and Johnson (1998)によるスケーリング則を用いて推定した. 白い部分は中規模繰り返し地震が存在しない場所. 黒コンターはYamanaka and Kikuchi, 2004によるM7以上の地震のすべり量分布, 橙色コンターは飯沼・他, 第190回地震予知連絡会東北大資料による本震のすべり量分布 (単位 m). 本震大すべり域の周囲にすべりが見られる. 大すべり域内の繰り返し地震には本震以降ほとんど活動がない. 1994年三陸はるか沖地震及び1968年十勝沖地震の南側アスペリティ近傍にも余効すべりがおよんでいる. 用いている地震数が少なく、グリッドに1つしか繰り返し地震グループがない場合も表示しているため、推定精度はあまり高くない. また本震後の欠測、地震の重なり、震源過程の変化等により、繰り返し地震を取り逃している可能性もある.



・ 図3. 5つの領域での平均の積算すべりの時間変化。(a) 設定した解析領域. 黒丸は2011年東北地方太平洋沖地震以降4月30日までに地震を起こしたグループ。(b), (c) 領域1-5での積算すべり. 縦線は2011年東北地方太平洋沖地震の発生時を示す. 領域の取り方により平均の積算すべり量には違いが出ることに注意が必要.

RTK-GPS データによる震源断層の即時推定

リアルタイム・キネマティック GPS (以降 RTK-GPS) 解析時系列にもとづいて、2011 年東北地方太平洋沖地震の震源断層の即時推定のシミュレーションを行った。GPS データには GEONET 観測点 527 点の 1 秒サンプリングデータを用いた。RTK 解析は RTKLIB Ver. 2.4.0. (Takasu, 2010) による基線解析を行った。固定点は三重県鳥羽であり、最長基線長が 900 km におよぶ長基線解析である。得られた RTK-GPS 解析時系列に対して、LTA/STA を用いた変位の自動検知、変位量の自動推定アルゴリズム (Kobayashi et al., 2010) を適用し、得られた水平、上下 3 成分の変位ベクトルから 20 秒毎に矩形断層を先験情報付インヴァージョン解析 (Hasegawa and Matsu'ura, 1987) によって推定した。その結果、地震発生後 65 秒で Mw 7.0, 同 80 秒で Mw8.0, 同 145 秒で Mw8.6 の震源断層を推定することができた。RTK-GPS 解析はリアルタイム解析が可能であり、また矩形断層推定は 5-10 秒程度の計算時間で完了するため、ほぼ即時的に震源断層推定が可能である。

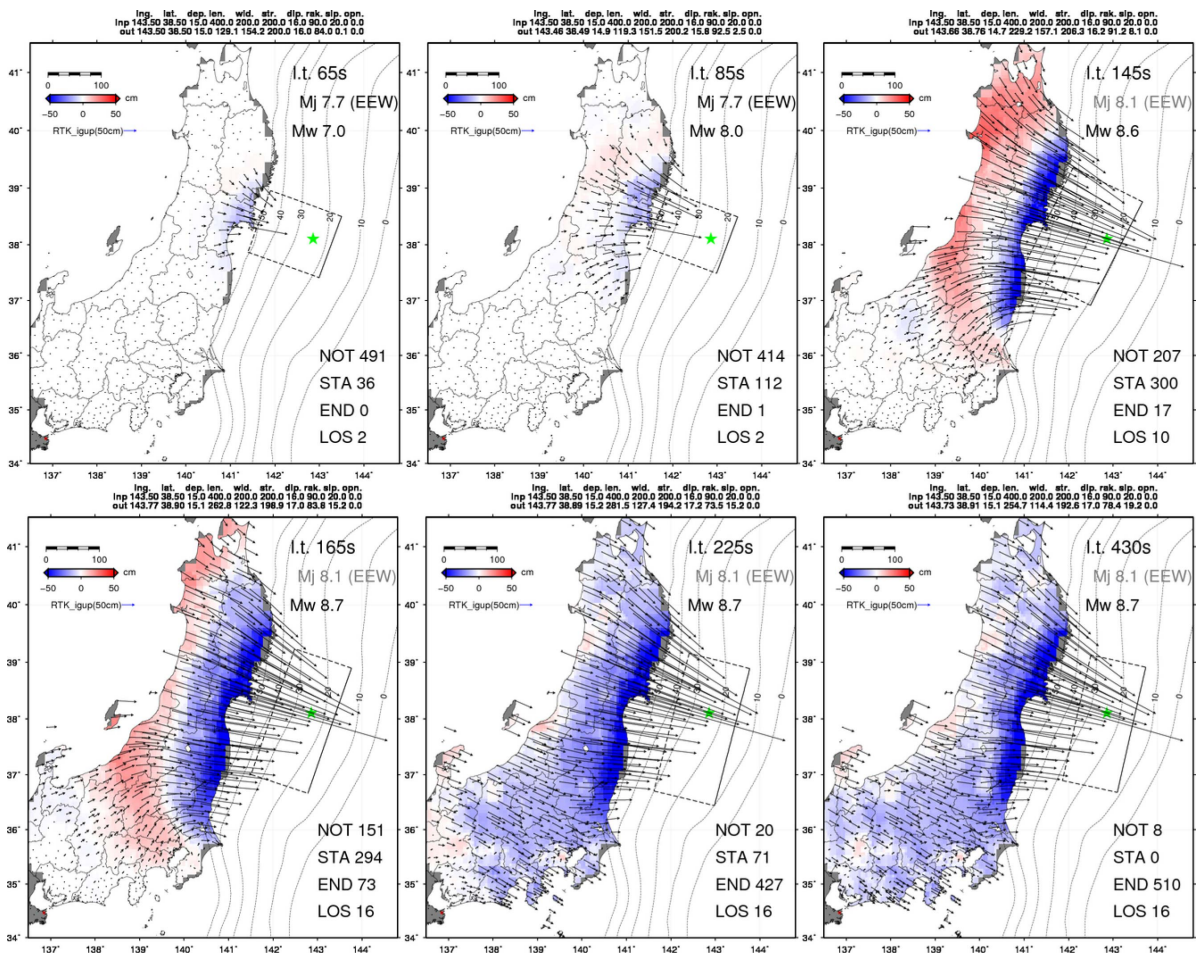


図 1 RTK-GPS 時系列に対して LTA/STA を用いた変位の自動検知と変位量の自動推定アルゴリズム (Kobayashi et al., 2010) を適用して得られた 2011 年東北地方太平洋沖地震の水平 (矢印)・上下変動場 (赤, 青色) のスナップショット。図中黒矩形が得られた変動場から推定された震源断層モデル。図中に気象庁緊急地震速報による M と本手法で推定される Mw を併記した。地震発生後 430 秒時点で中部日本に広く現れている南東向きの水平変動は、変位量の自動推定を行う際に地震波の影響を受けて誤推定しているために生じており、変位量推定アルゴリズムの改良が今後必要である。