

平成 24 年度年次報告

課題番号：1444

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

超巨大プレート境界地震による内陸域の応力変化及び応力集中メカニズムの解明

(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：

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
 - ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布
- (2) 地震・火山噴火に至る準備過程
 - (2-1) 地震準備過程
 - ウ. ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

(5) 本課題の 5か年の到達目標：

東北地方太平洋沖地震発生後、日本列島内陸各地で地震活動が活性化あるいは静穏化するなど、地震活動に変化が生じた。これは、超巨大地震によって、プレート境界域のみならず、日本列島内陸域の応力状態が大きく変化したことを示すものである。長野県北部や茨城県北部で発生した M7 クラスの地震は、活発化した地震活動の顕著な例と言えよう。同様の現象は 1896 年の三陸地震 (M8.2) のほぼ 2 か月後に発生した陸羽地震 (M7.2) でも見られており、このような超巨大地震の発生は、内陸大地震発生の一つのメカニズムとして捉えるべきであろう。

本課題は、東北太平洋沖地震によって生じた地震活動変化を解明するとともに、広域応力の変化が個々の内陸震源断層周辺の応力場にどのように影響を与えるかを明らかにして、内陸大地震の発生機構解明に貢献することを目指す。

(6) 本課題の 5か年計画の概要：

本課題では、東北地方太平洋沖地震発生後の活発化した地震活動域において、地震観測を基軸とした総合観測を実施し、まず、超巨大地震によって引き起こされた内陸域の応力場の変化と地震活動変化の実態を明らかにする。さらに、個別の内陸断層への応力集中のメカニズムを明らかにする。そのために、以下の研究を行う。

1. 内陸地震活動の応力変化応答の解明

日本に展開された高密度高感度地震観測網の観測データを基軸とし、GPS データ等の他の地球物理データを活用しつつ、列島域における地震活動変化と応力場の時間変化を、東北地方太平洋沖地震発生前から後まで追跡する。

2. 超巨大プレート境界地震に伴う応力の内陸地震断層への集中メカニズムの解明

応力集中のメカニズムとして、以下の2つの要因を作業仮説として考える。

- (1) 地震時の破壊及び余効的滑りに起因する応力変化
- (2) (1)にともなう内陸域の流体の影響

これらのメカニズムの解明のため、地震活動が活発化している地域において、基盤的高感度地震観測網を活用し、更に稠密な地震観測を実施する。すでに地震研究所は、長野県北部・新潟県南部、茨城県北部・福島県東部、房総半島～茨城県において地震観測を実施している。これらの観測成果を踏まえて、観測の継続/新規展開を進め、地震活動域における高精度震源・メカニズム解分布、3次元地震波速度・減衰構造を求め、応力変化、流体分布、活断層との関連などを明らかにする。(1)については、このような地震観測と海域観測・GPS観測との連携が有効である。(2)については、稠密地震観測と電磁気的観測との連携が効果的である。

(7) 平成24年度成果の概要：

1. 東北地方太平洋沖地震発生以前の内陸域の応力場

2011年東北地方太平洋沖地震に伴う内陸域の応力変化の有無をより詳しく明らかにするために、まず、過去の臨時観測のデータを再解析し、より多くの地震を解析に使用することで、東北地方太平洋沖地震が発生する前の応力場について再検討を行った。その結果、東西（あるいは西北西～東南東）圧縮の応力場は、脊梁から背弧側では見られる一方、前弧域では、島弧方向に変化があり、北上山地と阿武隈山地では、 σ_1 軸がプレート収束方向を向いていない傾向にある。その原因としては重力により作られる応力が、この地域で支配的である可能性が挙げられる。

2. クーロンの破壊規準に基づく誘発地震メカニズム解の分析

東北地方太平洋沖地震による内陸での誘発地震の発生メカニズムを理解することを目的に、広域応力場と本震による応力変化を考慮して、クーロンの破壊規準に基づく地震のメカニズム解の分析を行った。本震前後の地震活動度の変化は、クーロン破壊関数の変化 (ΔCFF) で概ね説明できるが、これに反して地震活動が活発化したところでは、間隙流体圧の上昇に伴う断層強度の低下が重要な役割を果たしたことが分かった。間隙流体圧の変化に関しては、モール円を用いて地震断層面の向きと応力場の関係を調べた結果、地域的に間隙流体圧が上昇した場合と、断層帶内の間隙流体圧が周辺域に対して相対的に上昇した場合があったものと考えられる。

3. 秋田県北部の森吉山周辺で発生している誘発地震活動

秋田県北部の森吉山周辺で発生している誘発地震について、震源域近傍に臨時観測点を設置して観測を開始した。そのデータを用いて決め直した震源分布によると、地震活動は中央のクラスターから始まり、東側、西側のクラスターでの活動が順次活発になった。このような震源の時空間分布は流体の浸入による活発化を示唆する。

4. 東北地方で発生した内陸域の誘発地震震源域の地震波速度構造と地震活動

東北地方太平洋沖地震によって東北地方で発生した内陸域の誘発地震群について、1) 震源域周辺の地殻内の地震波速度構造と2) 震源の詳細な時空間分布とについて検討を行った。Yoshida et al. (2012)によれば、秋田県南部などでは応力の変化が見られたが、それ以外の場所（秋田県北部・森吉山、福島・山形県境など）では、変化は見られず、むしろ、発生した誘発地震のメカニズムは応力変化と逆センスであったため、特に、それらの領域に着目した。これらの領域では、緊急合同観測で設置した観測点があるため、震源位置や速度構造の決定精度の向上が期待される。その結果、1) 火山下や震源域の深部に地震波速度の低速度域が見られた。この低速度域は流体の分布域であると考えられる。2) これらの領域では震源域が時間とともに広がる様子が見られた。この時間発展は流体の拡散で説明できる。したがって応力変化以外の別の原因としては流体圧の変化を挙げることができる。

5. 茨城県北部・福島県南東部の正断層運動型の地震活動と比抵抗構造

東北地方太平洋沖地震により誘発された茨城県北部・福島県南東部の正断層運動型の地震活動には、明瞭な時空間発展が観測された。この要因を調べるために、約60点から構成される臨時観測点を高密

度に展開・維持し、これらの臨時地震観測網のデータ及び周辺の定常観測網データを用いて、震源域の詳細な地震波速度構造と高精度な震源分布を推定した。震源分布は茨城県北部において南西傾斜の明瞭な面上分布を示すが、福島県南東部のいわき地方では小さな共役断層系からなる複雑な面状分布を示すことが明らかになった。2011年4月11日に発生した、福島県浜通りの地震（M7.0）の震源北側の浅部には、顕著な高速度体がイメージングされた。この高速度体は福島県浜通りの地震（M7.0）発生時の大滑り域に概ね一致する。更に、この高速度体内の余震活動は周囲に比べて低調である。また、福島県浜通りの地震（M7.0）の震源域の深部には流体の存在を示唆する低速度体がイメージングされた。一部の地震クラスターでは、流体の関与を支持する震源の移動現象が見られた。このような地殻内の不均質な構造が、誘発地震活動の時空間発展を規定していたと考えられる。

また、多くの誘発地震は10km以浅で起きているが、深さ15-20kmにも局在化して発生していることが明瞭になった。この地震のメカニズム解を調べたところ、正断層型だけでなく、横ずれ型・逆断層型も発生しておりメカニズム解に多様性が見られた。

一方、茨城県北部・福島県南東部の地域において、地震発生に関する流体の寄与を調べるために、20箇所以上で地球電磁気学的調査を行った結果、地震発生域には比抵抗が高い領域と低い領域が混在することが分かった。これを詳しく見ると、4月11日の福島県浜通りの地震（M7.0）の震源域は高比抵抗であるのに対し、その前から3月11日以降既に誘発地震活動が起きていた茨城県側などでは低比抵抗となっている。つまり、流体が多い場所で最初の誘発地震活動が発生し、福島県浜通りの地震（M7.0）の震源域は流体間隙圧が小さく流体が少なく、相対的に強度が強くしばらく持ちこたえていたものが、時間遅れを伴って大きな地震を引き起こしたものと考えられる。

6. 長野県北部の地震の震源分布と発震機構解

2012年7月10日に長野県北部を震源とするマグニチュード（M）5.2の地震が発生した（図6a）。この地域は、新潟から神戸にかけてのひずみ集中帯に位置し、普段から地震活動が活発な地域である。過去には、1847年の善光寺地震（M7.4）、2004年中越地震（M6.8）や2007年中越沖地震（M6.8）等のM7級の被害地震が並んで発生していて、十日町断層帶、信濃川断層帶等の活断層があり、活褶曲構造が知られている地域もある。これらの走向は、主に北東—南西方向で南東傾斜もしくは北西傾斜の逆断層であり、最近の被害地震は、そのような逆断層型の地震が主である。それに対し、今回の地震の発震機構解は、P軸は同様の北西—南東方向であるが、T軸が北東—南西方向である横ずれ型の地震であった。そこで、震源域直上に3点の臨時観測点を設置した。波形データは、周辺の既存観測点のデータと統合し、気象庁一元化震源に基づいて波形を切り出して、読み取りを行った。震源決定に用いた速度構造は、人工地震探査の結果等から、この地域に適した一次元速度構造を用いた。震源決定はHypoMHを用い、その際に、この地域の構造は不均質が強いことが知られているため、観測点ごとの残差の平均を観測点補正值として用いている。その結果、余震は、ほぼ東西方向の走向を持った鉛直な面状に分布し、深さは約5~10kmの範囲になった（図6b）。この走向が発震機構解の節面の一つとほぼ一致することから、これが今回の地震の地震断層面であると思われる。この震源域のすぐ北東側や東側では、東北地方太平洋沖地震の直後にM6.7、1か月後にM5.6の地震が発生し、それぞれ逆断層型と横ずれ型である。このように狭い範囲での発震機構解の違いは、東北地震によるこの地域の応力状態が時間変化したためと考えることもできるが、以前から新潟県と長野県の県境付近では同様の発震機構解の違いが見られていたことから、地域差が原因である可能性も考えられる。

7. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震発生後、東北地方内陸域では秋田県北部の森吉山周辺、福島県・山形県境付近、茨城県北部・福島県南東部等の数か所で活発な誘発地震活動が発生し、現在に至るまで活動的な地域も存在する。また、長野県北部のように1年以上経過したのちに活発化した地震活動も見られる。これらの誘発地震活動は、東北地方太平洋沖地震本震の断層運動によるクーロン破壊閾値の変化（ ΔCFF ）で概ね説明できるが、それには反する場合には間隙流体圧の上昇に伴う断層強度の低下が重要な役割を果たした。とくに、顕著な誘発地震活動の領域では明瞭な震源移動が観測されており、流体の拡散が地震発生に影響を与えている可能性がある。また、これらの誘発地震活動域の深

部には地震波速度の低速度域が見らる場合が多く、この低速度域は流体の分布域であると考えられる。例えば、茨城県北部・福島県南東部では、東北地方太平洋沖地震の本震発生の1か月後にM7.0の福島県浜通りの地震が発生しており、その大滑り域は高速度体・高比抵抗体に対応し、その深部には流体の存在を示唆する低速度域が広がっているとともに、大滑り域の周囲は低速度・低比抵抗で特徴付けられ、M7.0の発生前から誘発地震活動が開始していることから、このような構造の違いが地震発生に大きな影響を及ぼしたことが考えられる。また、阿武隈山地を含む前弧域では、東北地方太平洋沖地震発生以前から σ_1 軸がプレート収束方向を向いていない傾向にあり、その原因としては重力により作られる応力が、この地域で支配的である可能性が挙げられる。そのことが、非常に活発な正断層型地震活動を誘発した原因かも知れない。

(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）：

1.

Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Okada, T. Iinuma, Y. Ito, and Y. Asano, Stress before and after the 2011 Great Tohoku-oki earthquake, and induced earthquakes in inland areas of eastern Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 39, DOI: 10.1029/2011GL049729, 2012.

Yoshida, K., T. Okada, and A. Hasegawa, Crustal stress field formed by plate convergence and topography in northeastern Japan, *Geophys. Res. Lett.*, Submitted, 2013.

2.

Terakawa, T., C. Hashimoto, and M. Matsu'ura, Changes in Seismic Activity Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake: Effects of Pore Fluid Pressure, *Earth and Planetary Science Letters*, 19.1016/j.epsl.2013.01.017, 2013 (in press).

Terakawa, T., C. Hashimoto, M. Matsu'ura, Changes in Seismic Activity Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake: Effects of Pore Fluid Pressure, *The 8th ACES International Workshop*, Maui, USA, 2012.

Terakawa, T., C. Hashimoto, M. Matsu'ura, Changes in Seismic Activity Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake: Effects of Pore Fluid Pressure, *AGU 2012 Fall Meeting*, S33-2493, 2012.

Terakawa, T., C. Hashimoto, M. Matsu'ura, Changes in Seismic Activity Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake: Effects of Pore Fluid Pressure, *CORSSA 2.0 Workshop*, Tachikawa, Japan, 2013.

寺川寿子, 2011年東北地方太平洋沖地震による余震・誘発地震発生メカニズムの多様性, 日本地球惑星科学連合2012年大会, SSS31-05, 2012. (招待講演)

寺川寿子, 2011年東北地方太平洋沖地震による余震・誘発地震の発生メカニズムの多様性, 内陸地震研究グループ次期計画検討シンポジウム, 東京, 2012.11.28.

寺川寿子・中道治久・山中佳子・渡辺俊樹・奥田隆・堀川信一郎・山崎文人, 地震メカニズムトモグラフィー法による御嶽山周辺域の3D間隙流体圧分布, 日本地震学会2012年秋季大会, A11-08, 2012.

寺川寿子, 地震メカニズムトモグラフィー法による御嶽山周辺域の3D間隙流体圧分布, (公財)地震予知総合研究振興会・東濃地震科学研究所・平成24年度第2回地殻活動委員会, 2012.12.25 (招待講演)

3.

岡田知己・吉田圭佑・四ヶ所健太・高木涼太・長谷川昭・2011年東北地方太平洋沖地震合同余震観測グループ, 東北地方太平洋沖地震発生後の内陸地震活動とその意味, 地球惑星科学連合2012年大会, 2012.

4.

小菅正裕, 2012, 地殻流体が関与した可能性がある秋田県森吉山周辺の地震活動, 地球惑星科学連合2012年大会.

小菅正裕, 2012, 秋田県森吉山周辺で発生した浅発地震の波形に含まれる散乱波の特徴, 日本地震学会2012年秋季大会.

小菅正裕・増川和真・千葉正堯・渡邊和俊, 2012, 秋田県森吉山周辺の誘発地震活動の時空間変動, 東北地域災害科学研究集会.

5 .

Aitaro Kato, Toshihiro Igarashi, Kazushige Obara, Shinichi Sakai, Tetsuya Takeda, Atsushi Saiga, Takashi Iidaka, Takaya Iwasaki, Naoshi Hirata, Kazuhiko Goto, Hiroki Miyamachi, Takeshi Matsushima, Atsuki Kubo, Hiroshi Katao, Yoshiko Yamanaka, Toshiko Terakawa, Haruhisa Nakamichi, Takashi Okuda, Shinichiro Horikawa, Noriko Tsumura, Norihito Umino, Tomomi Okada, Masahiro Kosuga, Hiroaki Takahashi and Takuji Yamada, Imaging the source regions of normal faulting sequences induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake, Geophys. Res. Lett., 40, doi:10.1002/grl.50104, 2013.

加藤愛太郎, 五十嵐俊博, 酒井慎一, 小原一成, 武田哲也, 飯高隆, 岩崎貴哉, 東北地方太平洋沖地震合同観測グループ, 高密度地震観測に基づく誘発地震活動域の地震波速度構造～茨城県北部・福島県南東部, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.

加藤愛太郎, 五十嵐俊博, 酒井慎一, 小原一成, 武田哲也, 飯高隆, 岩崎貴哉, 東北地方太平洋沖地震合同観測グループ, 誘発地震活動域における応力場の特徴～茨城県北部・福島県南東部～, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.

小川康雄・上嶋誠・市來雅啓, いわき市周辺の広帯域 MT 観測, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.

6 .

酒井慎一・小原一成・岩崎貴哉, 長野県北部の地震 (M5.2) の余震活動, 日本地震学会秋季大会, 函館 (日本), Oct. 19, 2012.

(9) 平成 25 年度実施計画の概要 :

昨年度に引き続き, 平成 23 年度の緊急研究において長野県北部・新潟県南部, 茨城県北部・福島県東部, 房総半島～茨城県, 福島県北部・山形県南部, 秋田県内など, 東北地方太平洋沖地震後に活発化した地震活動域に展開した機動的地震観測を維持, 再配置するなど, 効果的に地震活動を把握するための観測を継続する. これらの収録されたデータ及び既存の高密度高感度地震観測網等の観測データを利用し, 高精度震源・メカニズム解分布, 3 次元地震波速度・減衰構造等を求め, 応力変化, 流体分布, 活断層との関連などを明らかにする. 得られた結果や他の地球物理観測データに基づいて, 東北地方太平洋沖地震前後の内陸地震活動の応力変化応答を明らかにするとともに, 超巨大プレート境界地震に伴う応力の内陸地震断層への集中メカニズムとして, 地震時の破壊及び余効変動に起因する応力変化やそれに伴う内陸域の流体の影響について検討する.

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

小原一成・岩崎貴哉・平田 直・三浦 哲・飯高 隆・酒井慎一・上嶋 誠・藏下英司・五十嵐 俊博・加藤 愛太郎

他機関との共同研究の有無 : 有

2011 年東北地方太平洋沖地震合同余震観測グループ (北海道大学 (高橋浩晃・勝俣啓), 弘前大学 (小菅正裕), 東北大学 (岡田知己), 千葉大学 (津村紀子), 防災科学技術研究所 (武田哲也), 名古屋大学 (山中佳子・寺川寿子), 京都大学防災研究所 (片尾浩), 高知大学 (久保篤規), 九州大学 (松島健), 鹿児島大学 (後藤和彦))

(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 : 東京大学地震研究所

電話 : 03-5841-5712

e-mail : yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL :

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：小原一成

所属：東京大学地震研究所

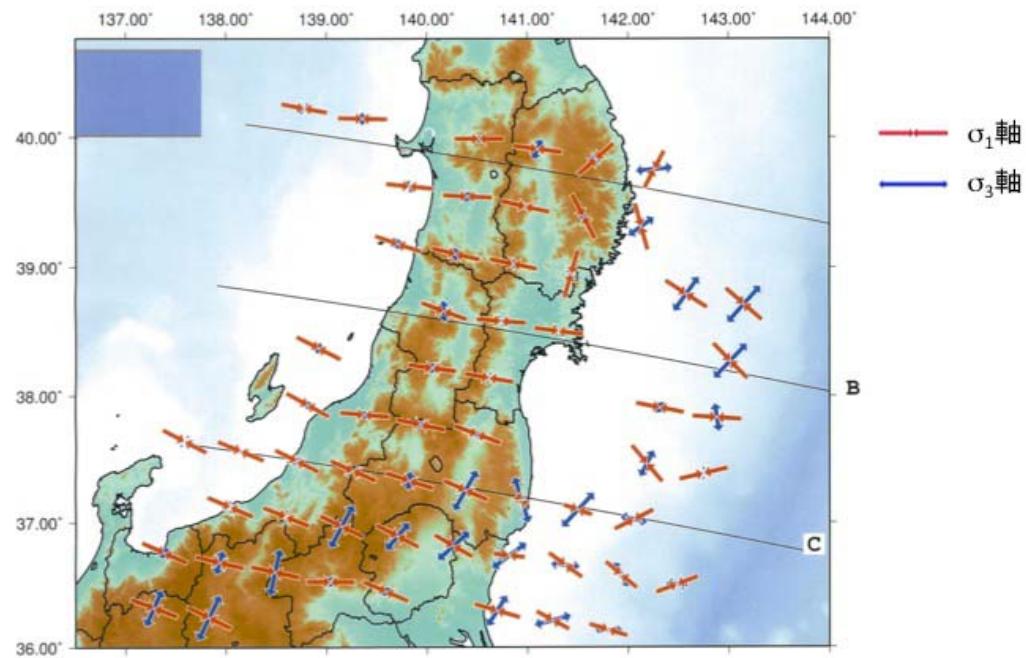


図1. 東北地方太平洋沖地震発生前の上盤側プレート内起震応力場.

赤は最大主応力軸を、青は最小主応力軸を示す.

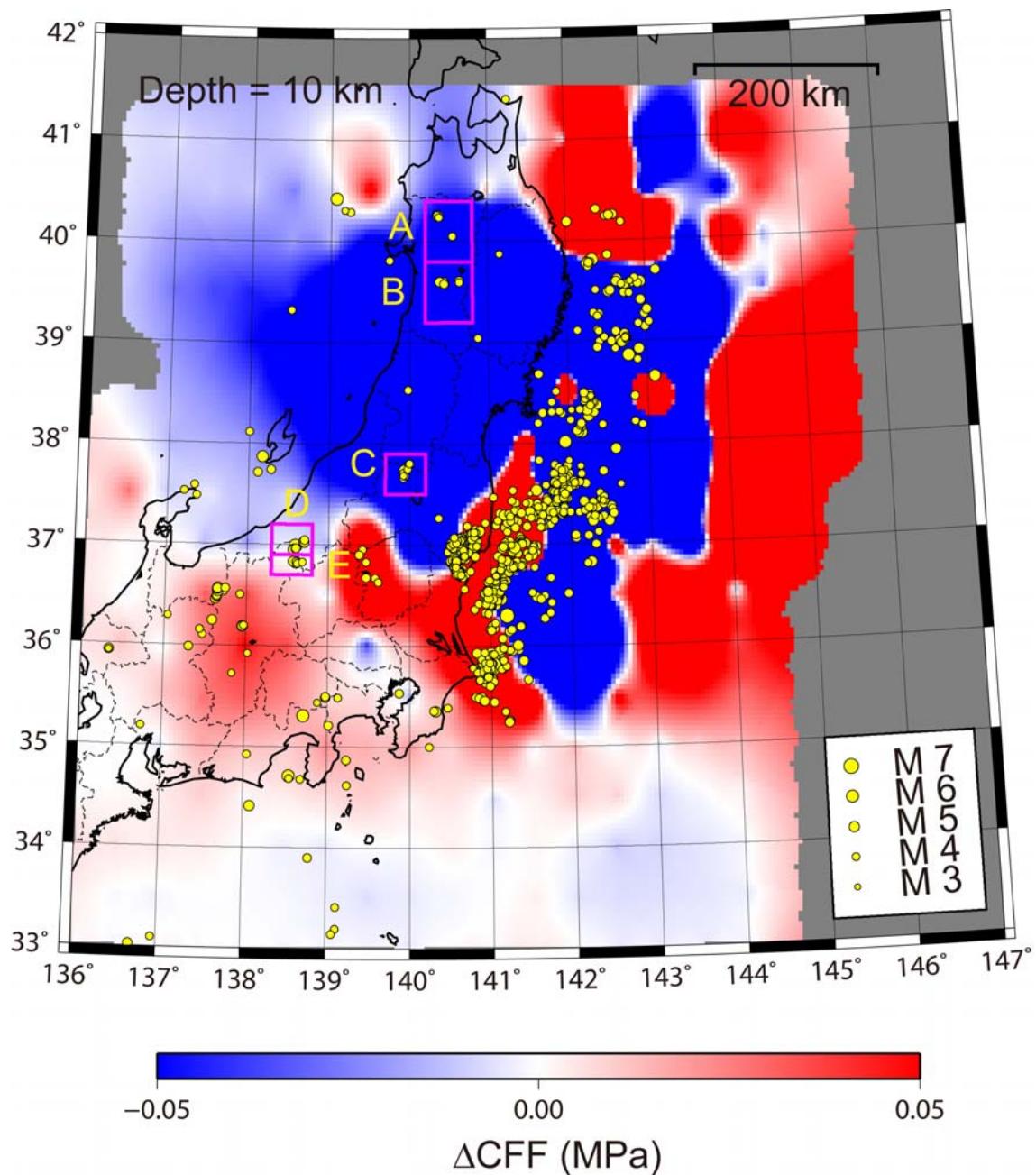


図2 a. 本震によるクーロン破壊関数の変化 (ΔCFF).

本震滑り (Hashimoto et al., 2012) による静的応力変化から、広域応力場 (Terakawa & Matsu'ura, 2010) の最大剪断面に働くトラクションの方向を考慮して計算した (深さ 10km, $\mu' = 0.4$)。黄色い○は上盤プレート (0-20km) で発生した地震 (NIED モーメントテンソルカタログ, 2011.3.11-2012.3.31) を示す。 ΔCFF が負にも関わらず、本震後に地震活動が活発化した領域 (A-E) がある。

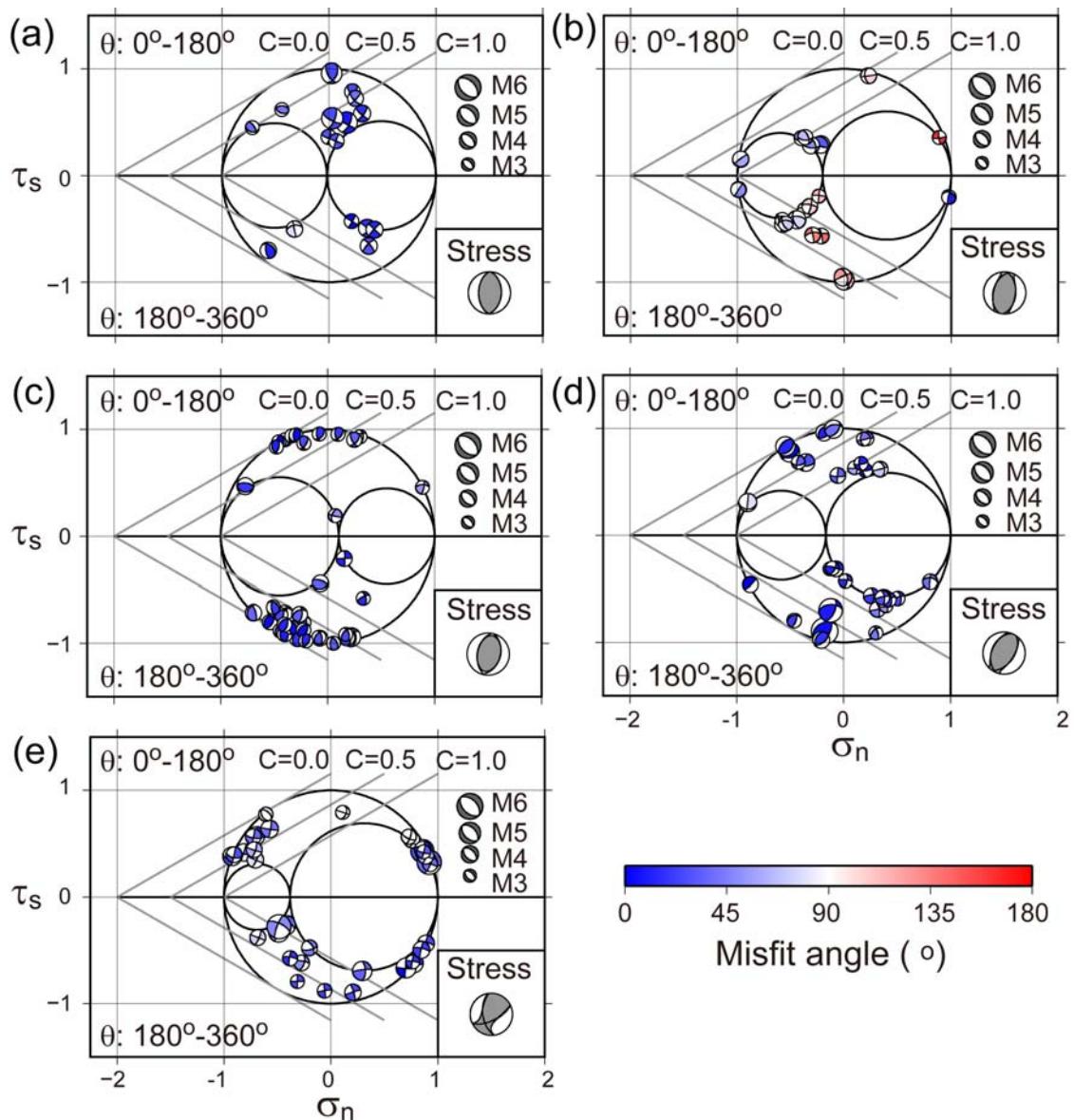


図 2b. 3D モール円上にプロットした余震のメカニズム解。

各対象地域（図 2a の A-E）の平均的な広域応力場のパターン（灰色の震源球）を表現するモール円上に、地震のメカニズム解（NIED, JMA, HASH, 2011.3.11-2012.3.31）を下半球投影の震源球でプロットした。震源球のカラースケールは、応力場から期待される理論的な滑り方向と実際の滑り方向のミスフィット角を示す。ミスフィット角が小さいことから、内陸では本震前後で大きな応力場のパターンの変化はなく、発生した余震の多くは間隙流体圧の上昇による断層強度の低下で発生したと考えることができる（例外は領域 B）。

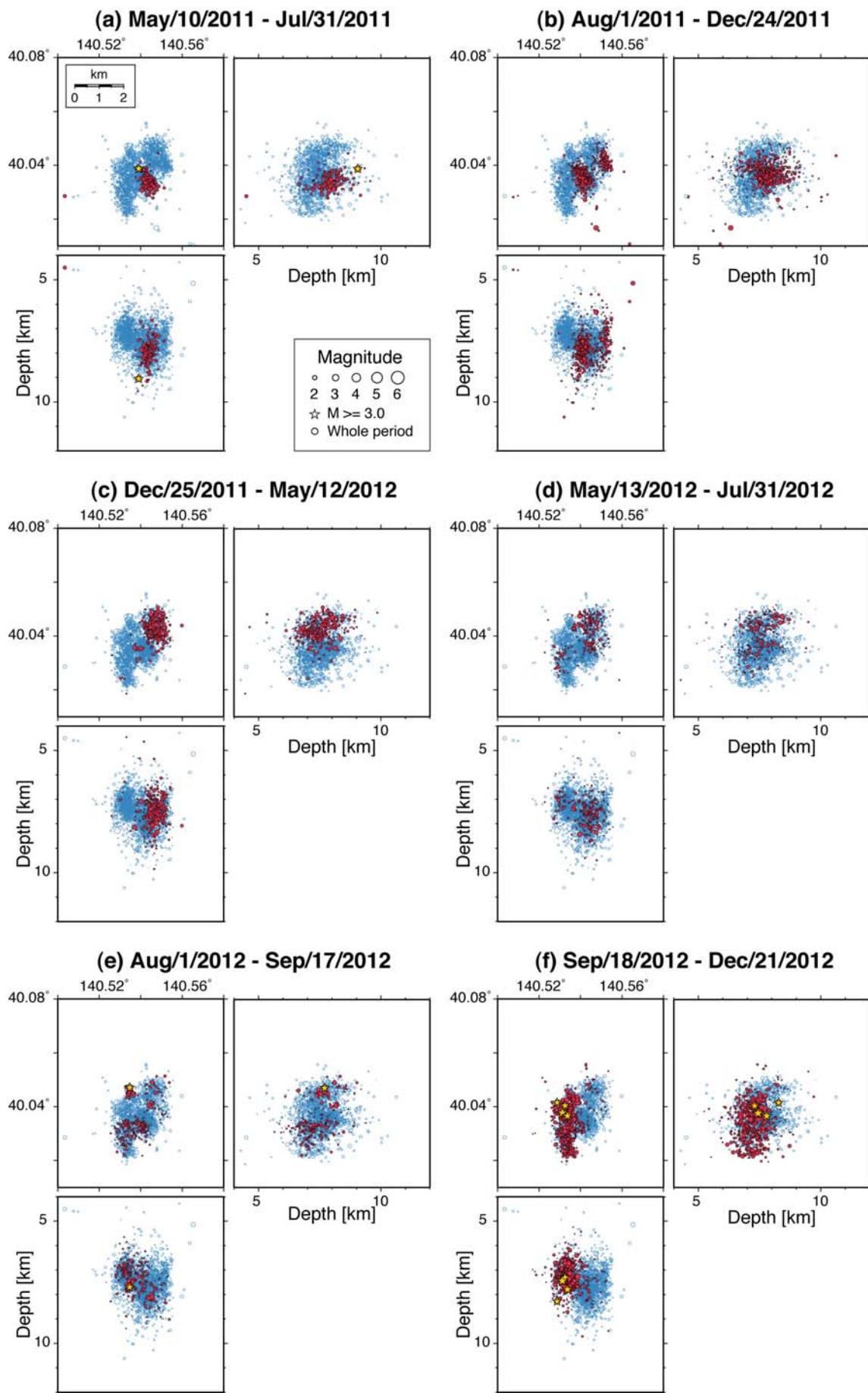


図3. 秋田県森吉山周辺での震源の時空間変化。
 青は全期間、赤は図の上に示される期間の震源を表す。星印はM3以上地震。

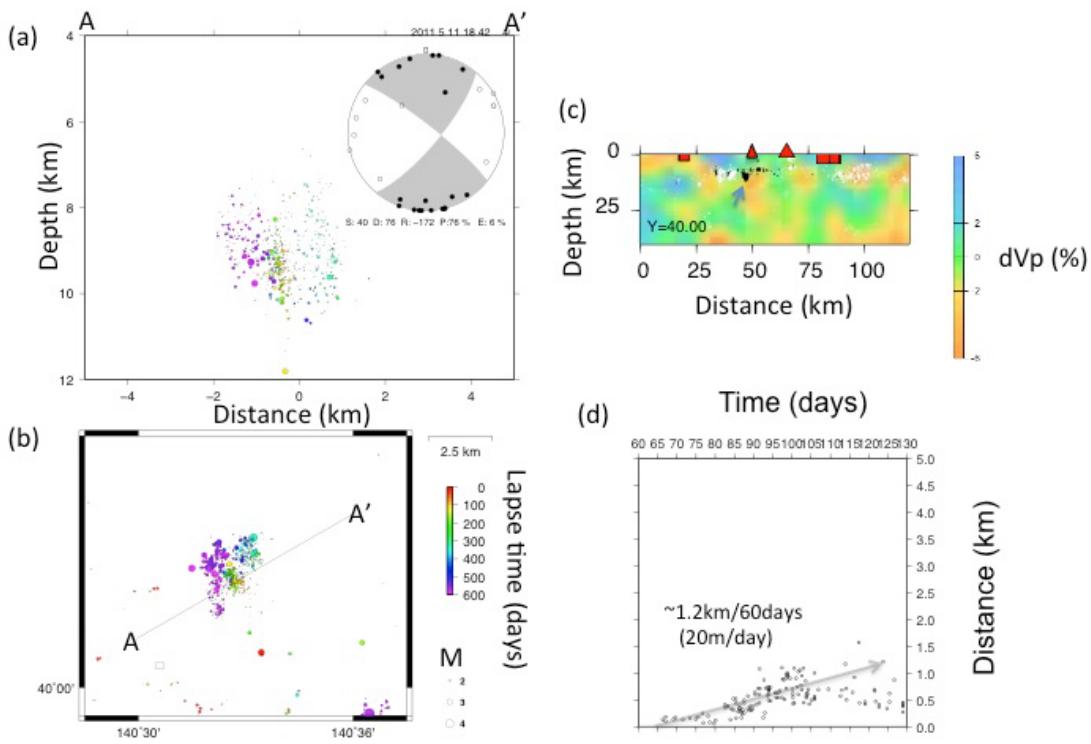


図4. 森吉山周辺で発生した誘発群発地震の震源分布。

(a)(b) の A-A' に沿う鉛直断面図。色は東北地方太平洋沖地震からの経過時間を示す。代表的なメカニズム解の例をあわせて示す。(b) 震央分布図。□は観測点を示す。(c) 群発地震の震源域を通る P 波速度偏差を、東西鉛直断面図で示す。白点は東北沖地震以前、黒点は東北沖地震後の震源を示す。▲は火山を、■は活断層を示す。(d) 横軸を経過時間、縦軸を最初のイベントからの距離として示す。

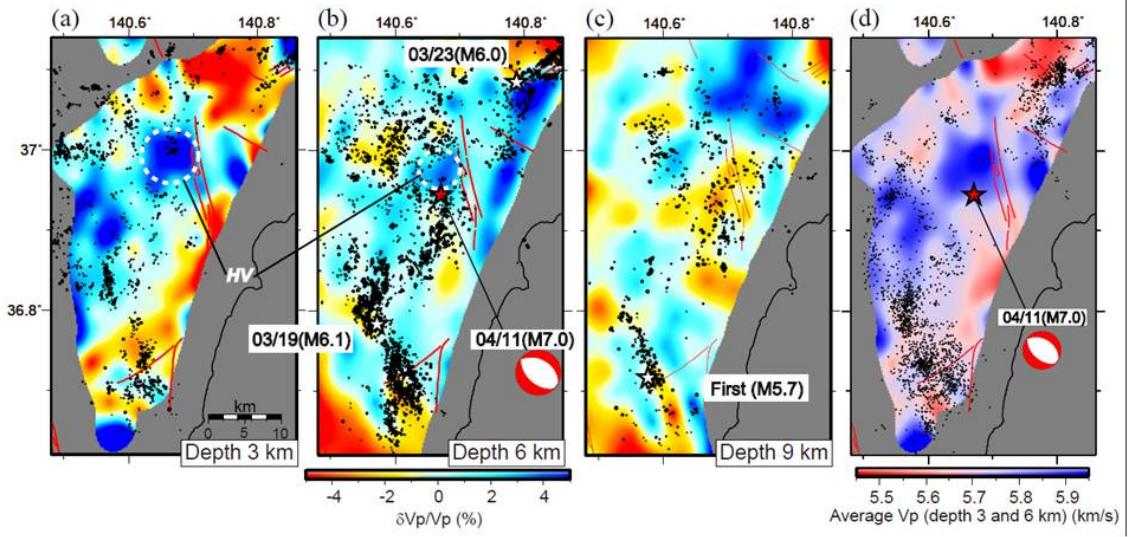


図5 a . P波速度パーターベーションの深さ 3 km(a), 6 km (b), 9 km (c)における分布.

それぞれの深さの 1.5 km 以内の再決定震源を黒点で示す. HV は高速度体を表す. (d) は深さ 3 km と 6 km の間の Vp 平均速度. 小さい点は東北地方太平洋沖地震(2011年3月11日)以降 M7.0 福島県浜通りの地震(2011年4月11日)までの気象庁一元化カタログに掲載されている地震の震央分布を表わす. 赤線は主要活断層を示す.

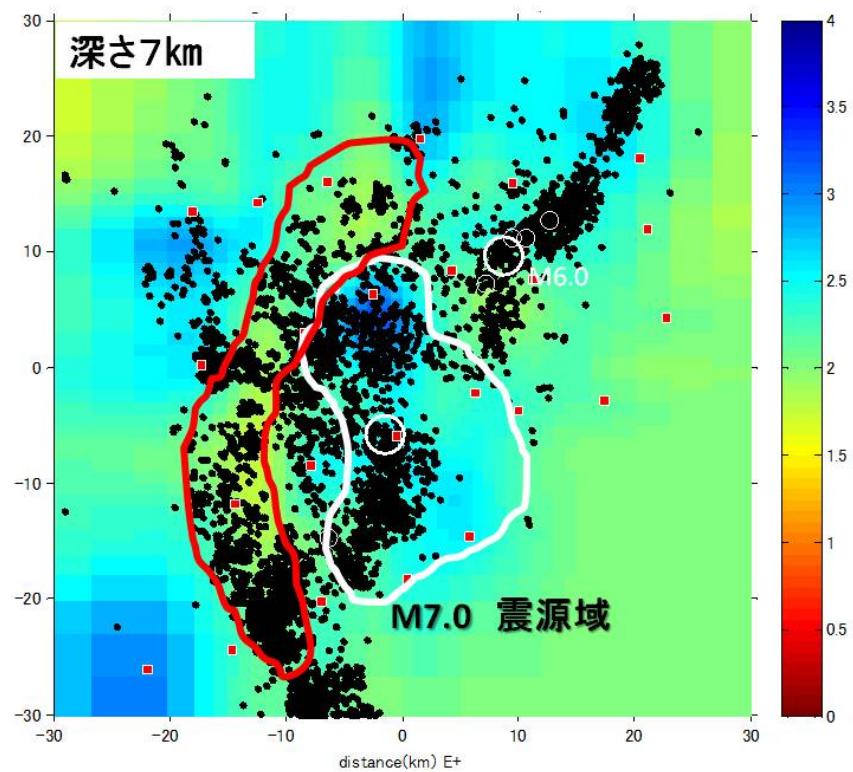


図5 b. 茨城県北部・福島県南東部地域における深さ 7 km での比抵抗分布図.

暖色系は比抵抗値が小さく、寒色系は比抵抗値が大きいことを表わす。図中の赤点の位置で調査を実施した。白線の領域は、2011年4月11日に発生したM7地震の震源域、赤線は特に比抵抗の小さな領域を示す。

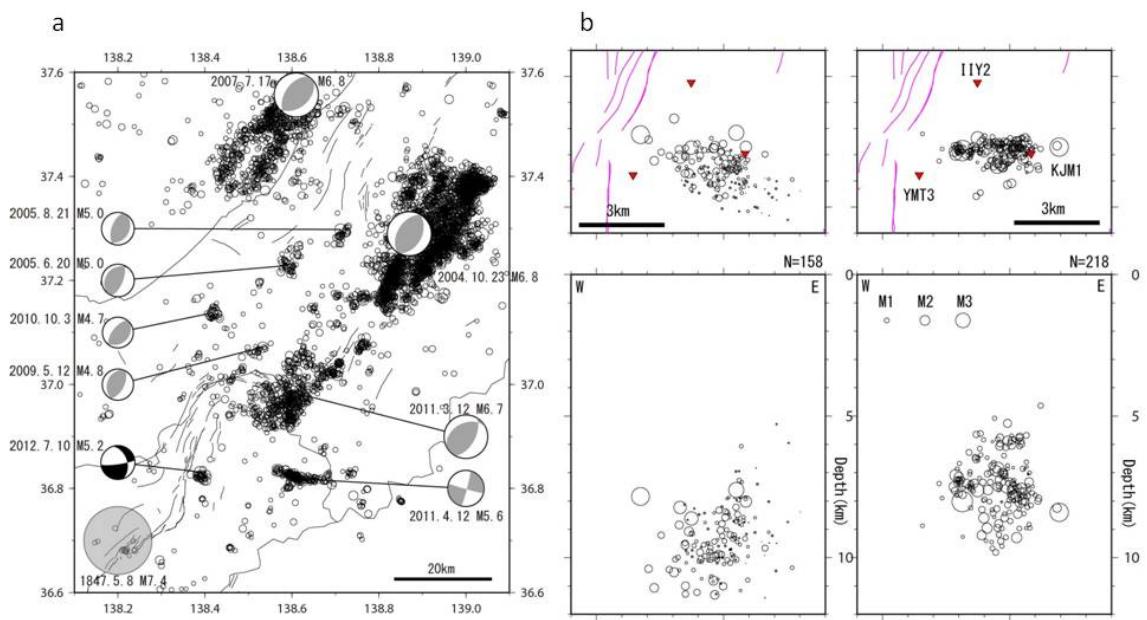


図6. 長野県北部の地震活動.

(a)長野県北部及び新潟県南部周辺の主な地震活動(気象庁一元化震源, 2003年1月1日～2012年7月31日, M2以上, 深さ30km以浅). 発震機構解は防災科研F-netによるもの. 灰丸は, 1847年の善光寺地震(M7.4)の震源.
 (b) (左図)既存観測点による震央分布(2012年7月11日17時～7月31日24時)と東西断面図. (右図)臨時観測点を加えて処理した震央分布と東西断面図.