

平成23年度年次報告

課題番号：9103

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所・東北大学・九州大学・鹿児島大学・京都大学防災研究所・名古屋大学・千葉大学・北海道大学・高知大学・弘前大学・防災科学技術研究所・神奈川県温泉地学研究所

(2) 研究課題名：

2011年東北地方太平洋沖地震に関する緊急研究－陸域観測－
サブテーマ2. 巨大地震に誘発された地震活動に関する調査

(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：

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
 - ア. 日本列島域
 - 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
 - (1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象
 - ア. 列島及び周辺域のプレート運動、広域応力場
 - (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
 - エ. スラブ内地震の発生機構

(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3月11日、東北地方太平洋沖地震(M9.0)とそれに伴う津波が発生し、多くの人命や国民の財産が失われた。この様な巨大地震は、全世界でも100年に数回しか発生せず、東北地方においては貞観地震(869年)以来約1150年ぶりの巨大地震・津波災害であると考えられる。このような超巨大地震の発生メカニズムを解明することは、学術上、防災上極めて重要である。また、この地震の発生を契機として、長野県北部、長野県西部、静岡県東部、茨城県北部、福島県南東部など日本国中の様々な場所で地震活動が明らかに高まっている。これまでも巨大地震(1896年6月15日明治三陸地震)発生直後に内陸で大地震(同年8月31日陸羽地震)が発生した例は、歴史の上では残されているが、その関連は解明されていない。

このような超巨大地震とそれに伴う現象が、日本のように比較的観測網の充実した地域で発生した例はない。特に、この巨大地震に誘発された日本全土にわたる地震活動の活発化は顕著である。この様な巨大地震に伴う周辺地震活動の活発化については、これまでもその存在が指摘されてきたが、日本のような高精度の観測網が整備された場所で発生した例はほとんどない。誘発地震に伴う二次災害を防ぐためにも、地震活動の誘発に関する研究を推進する必要がある。陸域の臨時観測により、この超巨大地震による周辺地域での地震活動を解明する。

東北地方太平洋沖地震の発生後に内陸部で活発化した地震活動域及びその周辺に、計100点程度の臨時地震観測点を設置し、誘発地震活動モニタリングを行う。茨城県北部、福島県南東部や長野県北部などの特に活発化した地域については平均5 km間隔で稠密に地震計を設置し、秋田県北・中部、福島県西部、群馬・栃木県境、富山・長野県境、静岡県東部、伊豆箱根などの地域では10 km程度の間隔で観測点を展開し、連続波形記録を収録する。これらの観測には、主として設置の簡便さを考慮し、多点展開が容易な乾電池駆動式の現地収録型レコーダを用い、

一部では衛星テレメータ等によるオンラインモニタリングを実施する。これらの観測には、大学等研究機関が所有する機器を使用する。長期間観測を継続するため、電池と記録媒体の交換を必要に応じて実施する。これらの収録データに基づき、ダブルディファレンス法、波形相関などによる高精度震源・メカニズム解決定を行い、震源分布の3次元形状と断層面解、トモグラフィ解析による3次元地下構造、及び活断層との対応関係を明らかにする。さらに、本震の震源断層モデルに基づいた広域な静的応力変化を推定し、日本列島に存在する既存の断層に対する影響を評価するとともに、本震地震波動による動的応力変化の影響を評価する。既存観測網や上記機動観測のデータに基づき、それぞれの誘発活動域、および静穏化域を含む日本列島全域における巨大地震発生前後の詳細な震源分布、メカニズム解、応力降下量などを調査し、巨大地震による広域応力場変化と内陸地震活動変化との関係に基づき、内陸地震発生メカニズムの解明に資する。

(7) 平成23年度成果の概要：

東北地方太平洋沖地震は、南北約500 km、東西約200 kmの領域を震源とする巨大地震であり、震源域を含む広範囲の領域で余震等の地震活動が非常に活発化した。これらの地震活動と東北地方太平洋沖地震との関係を調べるため、島弧の走向に平行な走向を持つ地殻内の正断層型および逆断層型地震、プレート境界面における逆断層型地震、および沈み込む太平洋プレート内のダウンディップ伸長型地震をレシーバ断層とし、東北地方太平洋沖地震の断層運動によるクーロン応力破壊関数の変化(ΔCFF)を調べた。おもな結果としては、陸域における逆断層型地震の抑制および正断層型地震の促進(図1)、海溝付近における太平洋プレート内の正断層型地震の促進、およびプレート境界固着域下端および震源域の南北端延長部におけるプレート境界型地震の促進などがあげられる。これらの結果は、実際に発生した地震のメカニズム解の分布と、概ね調和的である。

東北地方太平洋沖地震の発生の後、中部日本から東北日本にかけての領域において顕著な内陸地震活動の変化が生じたが、震源分布からは、東北地方太平洋沖地震前後の発生場所の変化が見られる。大局的には東北地方太平洋沖地震発生前にみられていた地震発生帯に起こっているが、詳細にはその周囲や活動がもともと低調であったところに起きてるように見られる。活動は群発的であり、震源域の拡大などもみられる。東北地方太平洋沖地震後に活発化した内陸浅発地震群についてダブルディファレンス法に基づく震源分布とメカニズム解から断層面を推定した結果、それらの断層に対して計算される ΔCFF はいずれもプラスである(図2)。

一方、2008年岩手・宮城内陸地震の余震活動をはじめとする、これまで東北地方において典型的な東西圧縮の逆断層型メカニズム解を有する地震に対しては、東北地方太平洋沖地震の断層運動による ΔCFF がマイナスであり、静的応力変化が地震活動に明瞭な影響を及ぼしている。

東北地方内陸域に発生する浅発地震のCMT解や初動極性メカニズム解を用いた応力テンソルインバージョン解析により応力場を調べた結果、秋田県内と福島県いわき市周辺の地域で、東北地方太平洋沖地震前後に応力場が変化し、東北地方太平洋沖地震の断層運動によって形成された応力場の変化と調和的であった(図3)。このことは、それらの地域における地震前の差応力が極めて小さかったことを示している。

また、東北地方太平洋沖地震の余震・誘発地震のモーメントテンソルをCMTデータインバージョン法により解析し、本震後の応力場のパターンと絶対応力場を考慮した ΔCFF の分析に基づいて、余震・誘発地震の発生メカニズムの理解が試みられた。

地震波速度構造と比較すると、東北地方太平洋沖地震前後の地震活動域の直下の中下部地殻には、島弧走向方向と並行に低速度域が存在する。例えば東北地方北部・岩手山以北においては前弧側にも分布しているようにみえる。

GPS観測データを用いて、東北地方太平洋沖地震に伴う応力変化に対する脊梁山地ひずみ集中帯の応答を明らかにした。均質媒質を仮定した時に期待される内陸のひずみに対する観測されたひずみの比は、岩手-秋田県境南部から宮城-山形県境のひずみ集中帯に沿って1より小さい(伸び足りない)(図4)。このことは、ひずみ集中帯の下部地殻の粘性が小さく、応力が緩和しているというモデルを支持し、地震波速度トモグラフィの結果とも調和的である。

したがって、東北地方太平洋沖地震に伴う応力場の変化が、地震活動の変化の原因として考えられる。それに加え、地殻深部に低速度域が分布する領域は、水などの流体を含む「弱い」領域として、地殻上部の弱面における地震活動を促進している可能性が考えられる。

福島県南東部から茨城県北部にかけての常磐地域では、東北地方太平洋沖地震以降、4月11日のM7.0をはじめとする非常に活発な正断層型の地震活動が継続しているが、この地域では約60か所に機動的地震観測点を配置し、詳細な震源分布と3次元地震波速度構造を推定した。その結果、地震活動は東傾斜および西傾斜の複雑な面状分布から構成され、M7.0の破壊開始点直下には地震波速度が遅い領域が存在する(図5)。また広域トモグラフィーでは、常磐地域の地震活動は、中下部地殻内に南北に延びる低速度域の一部と良く対応する(図6)。この地域では、東北地方太平洋沖地震以前にもわずかながら地震活動が発生しており、それらは東北地方全域に卓越する東西圧縮とは異なる、正断層型のメカニズム解を有し、もともと水などの流体を含む「弱い」領域であったことが、誘発地震活動を招いたことが考えられる。

スラブ内では、4月7日に宮城県沖でM7.1の地震が発生したが、その断層モデルをGEONETおよび東北大学の稠密GPS観測網に基づいて解析した結果、推定された震源断層はその余震分布と良い一致を示した(図7)。震源断層の傾斜は沈み込むスラブに対して60度程度であり、プレートが沈み込む前にアウターライズで生じる正断層の傾斜角(e.g., Ranero et al., 2003)とほぼ一致する。さらに、スラブ内地震の震源域の詳細な速度構造を推定したところ、破壊の開始点および余震の並びに沿ってスラブマントルが低速度域を示すことが明らかになった。これらの結果は、アウターライズでの正断層運動の際に断層に沿ってスラブマントルまで取り込まれた含水鉱物、およびその脱水分解反応によって放出された水が、プレート内に局所的に存在していることを示唆している。従ってこのスラブ内地震は、アウターライズにおいて正断層として活動した断層が逆断層として再活動することによって発生した地震であると考えられる。

東北地方太平洋沖地震発生中及び直後は、東北日本のみならず、西南日本でも地震活動が活発化した。しかし、大振幅の波形に埋もれて微小地震の検出処理が十分ではなく、気象庁等のカタログは不十分であるため、連続波形記録から地震イベントを抽出し日本列島全体の地震活動を調べた。その結果、東北地方太平洋沖地震から放射された大振幅地震波動の到達に対応して、ローカルな微小地震が次々に発生し、その微小地震発生域が空間的に徐々に広がっていく様子が、震央距離約1400 kmに達するまで観測された(図8)。この地震活動の広がりは表面波の伝播に対応していること等から、地震波動伝播に伴う動的応力変化によって生じた誘発地震であることが分かった。

動的トリガリングの一つとして、箱根火山の地震活動が東北地方太平洋沖地震の表面波が通過する時刻から活発化している。この地域に展開された稠密地震観測網を用いてメカニズム解を決定した結果、過去の活動と同様な横ずれ型の地震が多く、また地震発生数は本震-余震型のように時間の経過とともにべき乗で減少していったことが分かった。

- (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) :
- 原田昌武, 明田川保, 伊東博, 本多亮, 行竹洋平, 板寺一洋, 吉田明夫 (2012) 2011年東北地方太平洋沖地震によって誘発された箱根火山の群発地震活動, 地震, 印刷中.
- Hiratsuka, S. and T. Sato, Alteration of stress field brought about by the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0), *Earth Planets and Space*, 63, 681-635, 2011.
- Kato, A., S. Sakai, and K. Obara, A normal-faulting seismic sequence triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: Wholesale stress regime changes in the upper plate, *Earth Planets and Space*, 63, 745-748, 2011.
- Miyazawa, M. (2011), Propagation of an earthquake triggering front from the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L23307 doi:10.1029/2011GL049795.
- Nakajima, J., A. Hasegawa, and S. Kita, Seismic evidence for reactivation of a buried hydrated fault in the Pacific slab by the 2011 M9.0 Tohoku earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G06, doi:10.1029/2011GL048432, 2011.

- 小原一成, 松澤孝紀, 2011, 2011年東北地方太平洋沖地震直後に誘発された西日本における微小地震・微動活動, 日本地震学会講演予稿集, P3-02.
- Ohta, Y., S. Miura, M. Ohzono, S. Kita, T. Iinuma, T. Demachi, K. Tachibana, T. Nakayama, S. Hirahara, S. Suzuki, T. Sato, N. Uchida, A. Hasegawa, and N. Umino, Large intraslab earthquake (2011 April 7 M7.1) after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (M9.0): Coseismic fault model based on the dense GPS network data, Earth Planets and Space, doi:10.5047/eps.2011.07.016, in press.
- Ohzono, M., Y. Yabe, T. Iinuma, Y. Ohta, S. Miura, K. Tachibana, S. Sato, and T. Demachi, Strain anomalies induced by the 2011 Tohoku Earthquake (Mw9.0) as observed by a dense GPS network in northeastern Japan, submitted to EPS.
- Okada, T. et al., Possible triggered shallow inland earthquakes in NE Japan by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets and Space, 63, 749-754, 2011.
- 岡田知己, 吉田圭佑, 長谷川昭, 2011年東北地方太平洋沖地震合同観測グループ, 2011年東北地方太平洋沖地震前後の内陸の地震活動と地殻構造, 日本地震学会2011年秋季大会, 2011.
- 寺川寿子, 橋本千尋, 尾形良彦, 松浦充宏, 東北地方太平洋沖地震による誘発地震の発生メカニズム, 日本地震学会2011年秋季大会, A12-10, 2011.
- 寺川寿子, 東北地方太平洋沖地震による誘発地震の発生メカニズム, 連動性研究会, 2012.
- Toda, S., J. Lin, and R. S. Stein, 2011, Using the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake to test the Coulomb stress triggering hypothesis and to calculate faults brought closer to failure, Earth Planets Space, 63, 725-730.
- Toda, S., R. S. Stein, and J. Lin, 2011, Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M=9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer, Geophys. Res. Lett., 39, L03302, doi:10.1029/2011GL049729, 2011.
- 遠田晋次, 東北地方太平洋沖地震による地震発生場の変化, 2011, 科学, 81, 1049-1054.
- 矢部康男, 大園真子, 飯沼卓史, 太田雄策, 2011, 東北地方太平洋沖地震により生じた内陸地殻のひずみ不均質, 日本地球惑星科学連合2011年連合大会, MIS036-P109.
- 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, L03302, doi:10.1029/2011GL049729, 2011.
- Yukutake, Y., R. Honda, M. Harada, T. Aketagawa, H. Ito, and A. Yoshida (2011), Remotely triggered seismicity in Hakone volcano following the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, 63, 737-740.

(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 :

東京大学地震研究所 小原一成、加藤愛太郎
他機関との共同研究の有無 : 有
九州大学 松本聡
鹿児島大学 後藤和彦
京都大学防災研究所 飯尾能久、遠田晋次、宮澤理稔、福島洋
防災科学技術研究所 武田哲也、田所敬一
名古屋大学 寺川寿子
千葉大学 津村紀子
神奈川県温泉地学研究所 行竹洋平
北海道大学 山田卓司
東北大学 中島淳一
高知大学 久保篤規
弘前大学 佐藤魂夫

(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：03-5841-8286

e-mail：obara@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/

(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

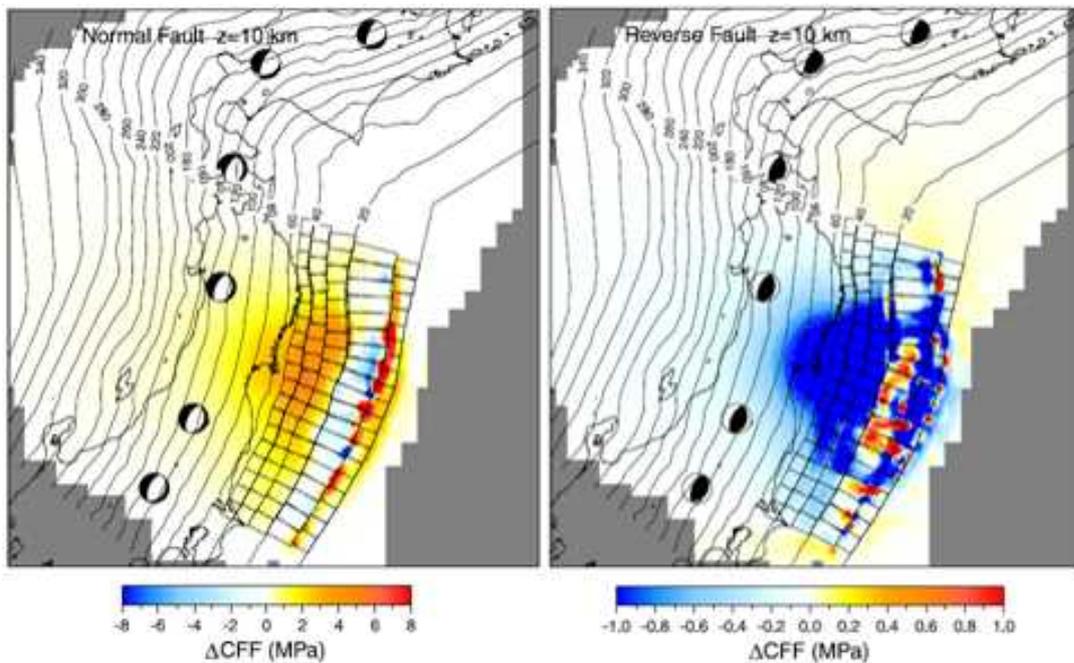


図 1. 深さ 10km におけるクーロン応力変化。レシーバは島弧の走向に平行な走向を持つ地殻内の正断層型（左）および逆断層型（右）地震で、東傾斜および西傾斜の両方の断層面について計算された ΔCFF の平均値を示す。東北地方太平洋沖地震の断層モデルは GSI(2011)を採用した。

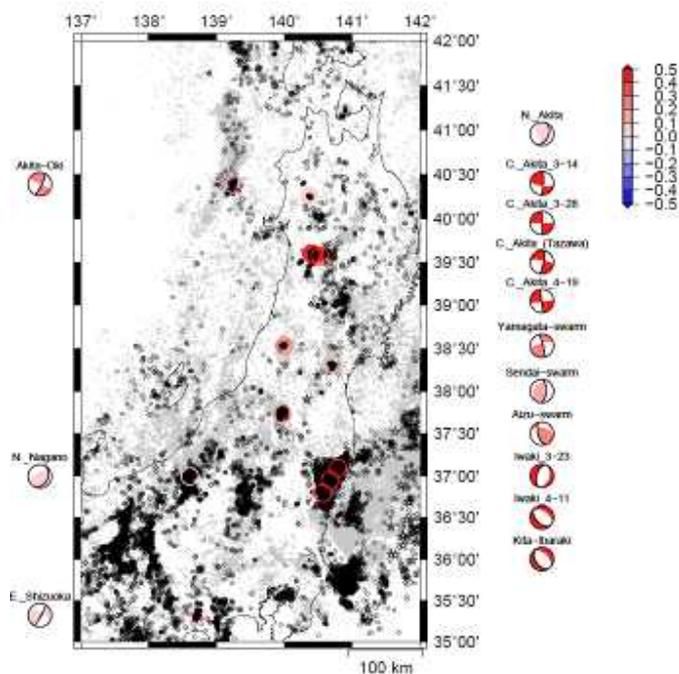


図 2. 断層面とクーロン応力変化 (Okada et al., 2011、岡田・他、2011)。メカニズム解と震源分布などから推定される断層面（太線で示す節面）に対するクーロン応力変化の値を○の色で示す。Coulomb3. 2(Lin and Stein, 2004; Toda et al., 2005)を使用した。いずれの断層に対しても、クーロン応力変化については正の値が推定されている。

ここでは東北地方太平洋沖地震のすべり量分布としては、Hayes (USGS, 2011)を使用した(挿入図：コンターはすべり量分布 (10m 間隔))。摩擦係数は 0.65 としている。あわせて、気象庁一元化震源による 3/11-4/11 の深さ 20km より浅い地震の震央分布 (黒丸)、灰色の○は 3/11 以前の浅い地震の震央分布を示す。☆は M5 以上の地震を示す。3/11 以降の活動は 3/11 以前に活動の高い領域およびその周辺におよそ見られる。

東北沖地震前後の内陸の応力場

Yoshida et al. (2011 GRL)

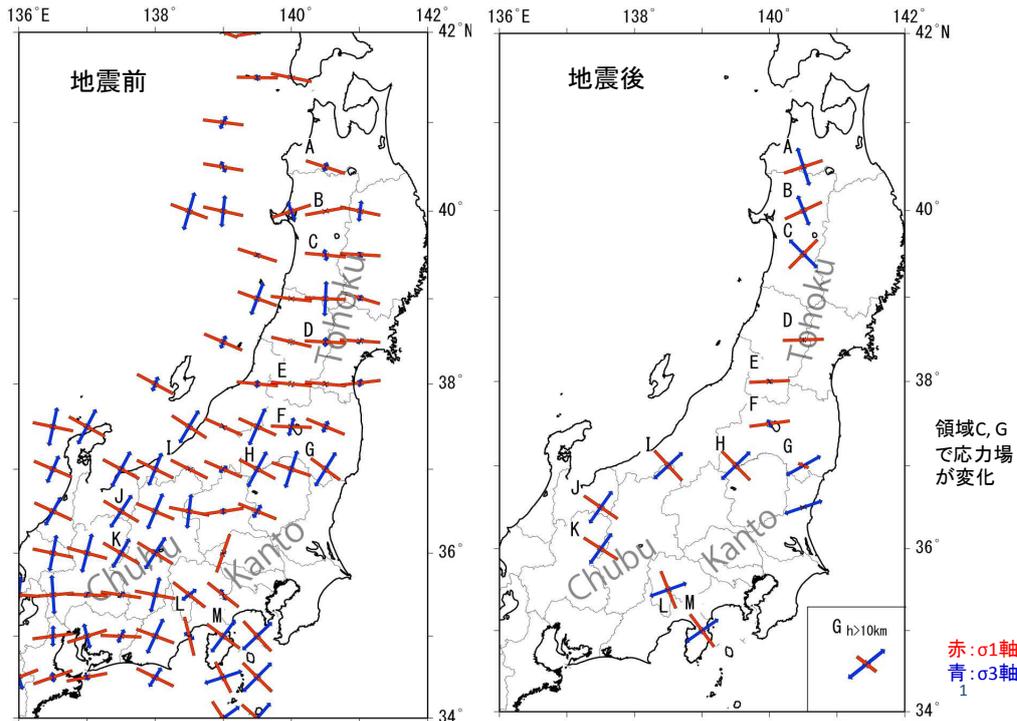


図 3. 東北地方太平洋沖地震発生前（左）及び後（右）のストレステンソルインバージョンによって推定された σ_1 と σ_3 の方向。深さ 20km 以浅の内陸地震の CMT 解に基づく。それぞれの長さは主軸の plunge を示す。右下の囲みは、領域 G で深さ 10-20km に限定した結果。

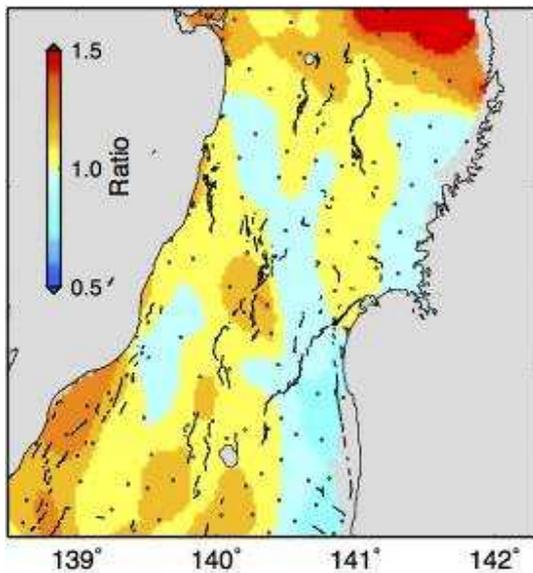


図 4. 東北地方太平洋沖地震の断層モデルから均質媒質を仮定した時に期待される内陸のひずみに対する GPS で観測されたひずみの比。

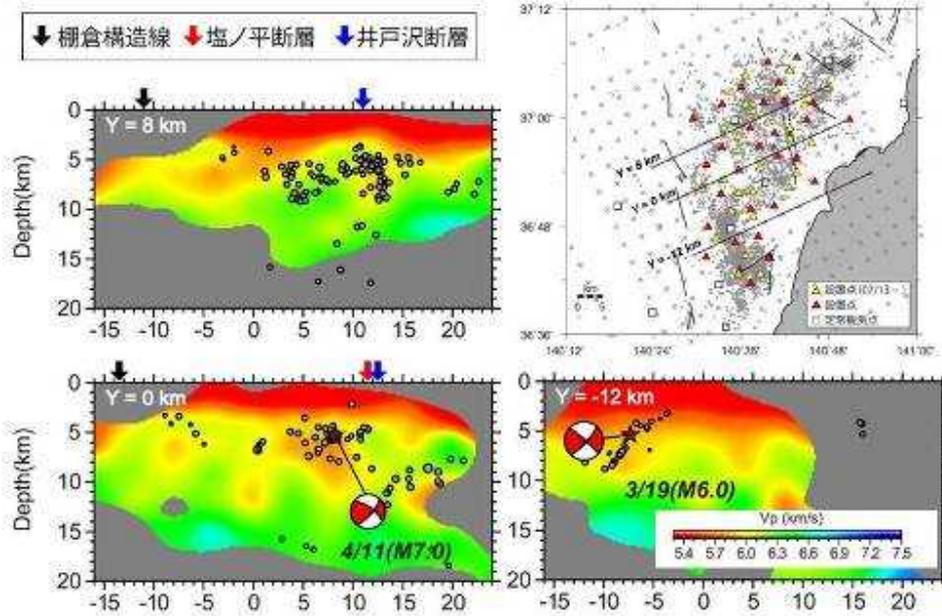


図 5. 常磐地域における機動的地震観測に基づく震源及び地震波 P 波速度構造の暫定結果。測線及び観測点配置を右の地図中に示す。それぞれの断面における構造線、断層の位置を矢印で示す。

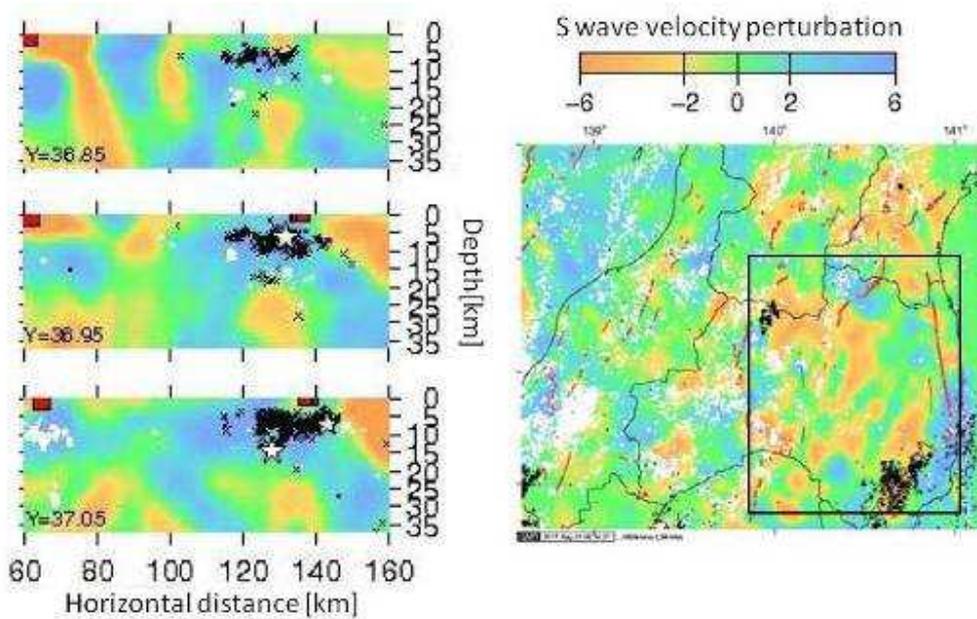


図 6. 東北地方南部における S 波速度偏差分布の東西鉛直断面図。右図には深さ 24km における S 波速度偏差を示す。白は東北地方太平洋沖地震前の地震、黒は東北地方太平洋沖地震後の地震を示す。☆は M6 以上の地震を示す。

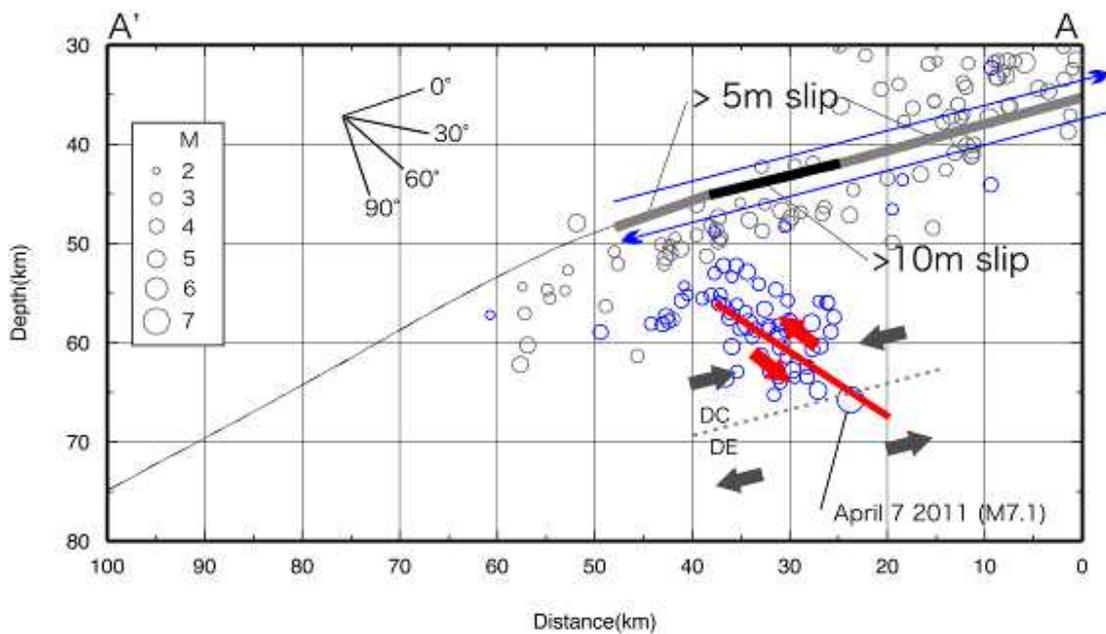


図7. 2011年4月7日に宮城県沖で発生したスラブ内地震(M7.1)の断層モデル。赤太線が推定された断層面。青丸印は2011年4月7日から10日までの余震分布、黒丸印は2011年3月11日から4月7日までの余震分布をそれぞれ示す。Down-dip compression (DC)、Down-dip extension (DE) はそれぞれスラブ内の応力状態を示す。

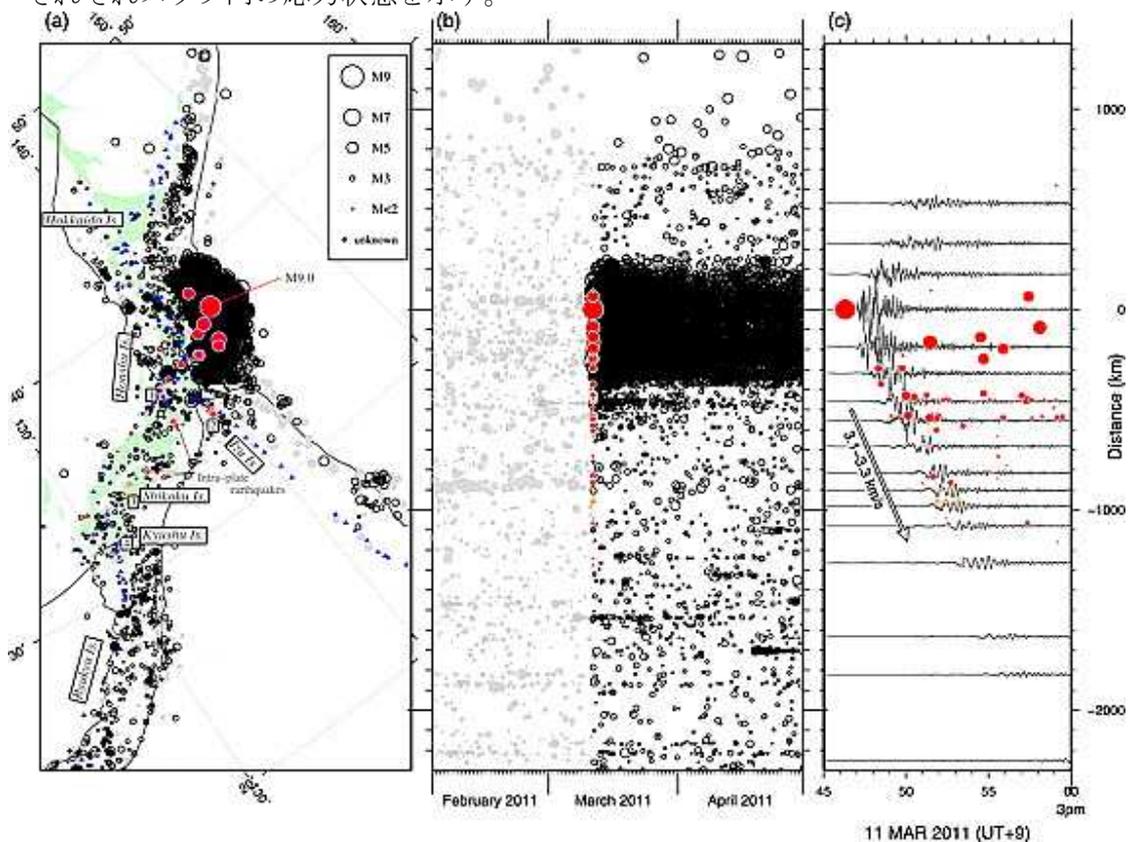


図8. (左・中図) 東北地方太平洋沖地震前後における深さ100kmより浅い地震の震央・時空間分布。M2以上の地震を灰色(本震前)と黒色(本震後)で、本震直後に発生した地震についてはM2以下を含め赤色、また深部低周波微動を黄色で示す。(右図) 本震直後に発生した地震及び深部低周波微動の時空間分布と0.01-1Hz帯域の上下動成分広帯域地震波形記録。