

2 (2) (2-1) 地震準備過程

「地震準備過程」計画推進部会長 飯尾能久
(京都大学防災研究所)

地震発生の準備過程を解明するために、地殻とマントルで応力が特定の領域に集中し地震発生に至る過程を明らかにするための観測研究を実施してきた。プレート境界地震に関しては、アスペリティ分布の推定精度を向上させるとともに、アスペリティ域に固有な地殻やマントルの性質の研究を進めることにより、「アスペリティモデル」の高度化を図ることを目指していた。さらに、プレート境界面上で進行する非地震性滑りの時空間変化を高精度に把握するとともに、アスペリティ間の相互作用についても理解を進めようとしていた。

上記の「アスペリティモデル」とは以下のような考えである。プレート境界上に地震性滑りが卓越する領域がパッチ状に分布しており、その周りは基本的に非地震的に滑っている。この地震性滑りが卓越する領域がアスペリティと呼ばれており、アスペリティ周辺の非地震性滑りにより、アスペリティに加わる応力が増加し、ついには地震発生に至るということが、基本的な地震発生のプロセスである。「アスペリティモデル」が認められていた背景には、例えば、2003年十勝沖地震は、1952年の十勝沖地震で破壊したアスペリティの再活動による地震であり、そのアスペリティ周辺で発生した非地震性滑りが2004年の釧路沖地震(M7.1)の発生を促進したと推定されることが上げられる。

しかしながら、東北地方太平洋沖地震の発生により、この単純な「アスペリティモデル」では説明出来ない超巨大地震の存在が明らかになった。そこで、本報告では、東北地方太平洋沖地震の発生過程の推定などを通じて、「アスペリティモデル」の検証を進める。そのため、以下においては、ア. アスペリティの実体とイ. 非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用の2つの小項目を一緒に記述し、その中で、東北地方太平洋沖地震に関するものを最初にまとめた。

内陸地震に関しては、広域の応力によって非弾性的な変形が進行して、特定の震源断層に応力が集中する過程を定量的にモデル化することが必要不可欠である。地震発生層である上部地殻と下部地殻・最上部マントルの不均質とその変形の空間分布を把握し、ひずみ集中帯の形成・発達と地震発生に至る過程に関する定量的なモデルの構築を行うことが重要である。また、スラブ内地震の発生機構を解明するため、スラブ内の震源分布や地震波速度構造を詳細に明らかにすることにより、スラブ内に取り込まれた流体の地下深部における分布と挙動の解明を図ることが重要である。

ア. アスペリティの実体 及び

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

(東北地方太平洋沖地震)

東北地方太平洋沖地震の大滑り域の実体等を解明するために、多くの精力的な観測研究が行われ、下記のような重要な成果が得られた。

GPS/音響結合(GPS/A)方式の海底地殻変動観測や海底水圧観測により、東北地方太平洋沖地震による大きな変位が観測された。海上保安庁水路部[課題番号:8006]によると、図1に示すように、最大で24mという大きな水平変位が捉えられた。さらに、宮城沖1と海溝軸の中間あたりに位置する観測点GJT3では、本震発生を挟む前後の期間で31mという水平変位が観測された(東北大学[課題番号:1202])。地震前後の海底水圧計・地震計の位置を比較することにより、GJT3より更に海溝寄りに位置する2つの観測点において、TJT1では2台の地震計が53m、62m東に移動、TJT2では52m、78

m, 及び 91 m 東または南東に移動したことが推定された (東北大学 [課題番号: 1206])。ただし, 水平変動量の測定には, 20 m 程度の観測誤差が含まれることに注意されたい。TJT 1 において観測された圧力記録が図 2 に示されているが, 本震発生時に明瞭なステップ状の水圧変化が捉えられ, 5 m の隆起に相当することが報告された (東北大学 [課題番号: 1206])。

GEONET においても, 東北地方太平洋側では東向きに 2~5 m, 日本海側でも 1 m 前後の水平変位, 牡鹿半島の先端部で最大 5.4 m の水平変位が観測された (図 3)。上下変動は岩手県から千葉県に至る太平洋側で 10 cm 以上の沈降, 日本海側では数 cm の隆起, 牡鹿半島先端部で最大 1.1 m の沈降が観測された。上記の海上保安庁による海底地殻変動観測点 5 点のデータを加えて推定した本震の滑り分布においては, 海溝寄りの深さ 10~20 km の領域で最大 60 m 弱の滑りが推定された (図 3c)。地震を引き起こした断層滑り域は, 岩手県沖から茨城県沖までの南北に長さ 400 km 以上, 幅およそ 150 km におよぶ長大なものであり, 海溝軸付近でもひずみエネルギーが蓄積されていたことが示唆された。また, 相対的に宮城県沖の沿岸寄りの滑りは小さいが, その滑り量は少なくとも 5 m 以上推定されており, 想定宮城県沖地震の震源域においても, 今回の地震により M7 クラスの数回分の滑りが解放されたと考えられている (国土地理院 [課題番号: 6014])。

海底水圧計により観測された TJT 1 の 5 m の隆起と, TJT 1, TJT 2 の海底地震計・水圧計の水平変動量を説明するために, 海溝近傍における陸側斜面の傾斜も考慮した現実的な断層モデルによる解析が行われ, 断層の上端が海底に到達し滑り量が 80 m という結果が得られた (東北大学 [課題番号: 1206])。F-net の速度型強震計の記録を用いて波形インバージョンを行った結果, 周期 50-170 秒においては点震源でほとんど説明できることが示された (防災科学技術研究所 [課題番号: 3012])。

余効変動については, 地震時の変動と同じ東向きの変動が卓越しており, 地震発生後 10 か月間で岩手県中部沿岸を中心に最大 90 cm 弱の水平変動が観測された (図 4a)。上下変動は青森県及び宮城県以南の太平洋側では隆起が, 岩手県の太平洋側と秋田県, 山形県の内陸部では沈降が観測されている (図 4a)。これらの GEONET データに基づいて推定された余効滑りは, 岩手県沿岸部に滑りのピークが位置しており, 地震時の大きな滑り領域よりも深部で発生しており, 最大滑り量は 2.9 m, モーメントマグニチュードは Mw8.57 に達していることが分かった (図 4b) (国土地理院 [課題番号: 6014])。

一方, GPS/音響結合 (GPS/A) 方式海底地殻変動観測点 GJT3 においては, 地震発生直後に実施した 4 月から 8 月と 10 月にかけて, 1.2 m の余効変動が観測された。陸上で得られた観測データからは推定が難しい, 海溝極近傍の浅部プレート境界において, より大きな余効滑りが発生している可能性が指摘された (東北大学 [課題番号: 1205])

東北地方太平洋沖地震の発生前, 日本海溝沿いのプレート境界で発生した 2005 年宮城県沖の地震, 2008 年茨城県沖の地震, 2008 年福島県沖の地震, 2010 年福島県沖の地震について, 地震時及び地震後の地殻変動, 推定されたモーメントの大きさを比べると, 2005 年宮城県沖の地震に関しては, 地震時と地震後ではほぼ同程度であるのに対して, 2008 年及び 2010 年の地震では, 地震後の変動及びモーメントが地震時に比べ

てはるかに大きく, また, これらの地震の地震時及び地震後の滑り領域は東北地方太平洋沖地震の震源域を取り囲む場所で発生していたことが指摘された (図 5) (国土地理院 [課題番号: 6014])。一方, 昨年度に, 上記の海底水圧計により観測されたゆっくり地震の予備的な解析結果が報告されていたが, 2011 年の本震時の滑り量を求めた断層モデルと同様のモデルを用いて, 2008 年に観測された非地震性の地殻変動データを再解析し, スロースリップ域の再推定を行った結果, 2011 年 3 月 9 日の最大前震の滑り域, 及びその後の前震活動域の浅部延長部に位置することが示された (東

北大学 [課題番号：1206])。

余震分布を正確に求めるために、多数の海底地震計を用いた緊急余震観測が行われた。経費の一部は、平成 22 年度及び 23 年度文部科学省科学研究費補助金特別研究促進費本震にもよっている。発生後 4 日目から約 7 か月間、最大で 120 台以上の海底地震計が設置された。図 6 に、最初の約 3 か月間における 1005 個の余震の高精度な震源分布が示されている (東京大学 [課題番号：1416])。

定常観測網のデータを用いた余震の震源決定により、余震が 1968 年十勝沖地震及び 1994 年三陸はるか沖地震のアスペリティ内部ではあまり発生していないことが見出された。このことは、1994 年三陸はるか沖地震とそれに続く余効変動により、ひずみエネルギーが解放されていたためである可能性がある。また、余震分布の北端の位置は、本震発生からの経過時間の対数に比例するように拡大したことも指摘された (弘前大学 [課題番号：1101])。

depth phase の一種である sP 波の走時を合わせたトモグラフィ解析により推定された東北地方太平洋側の海域下の地震波速度構造には、明瞭な南北方向の構造不均質があり、宮城県沖を中心に高速度異常域が見られるのに対して、その南北の岩手県沖及び福島県沖では低速度異常が見られることが推定された (図 7)。東北地方太平洋沖地震の滑り量が特に大きい範囲が高速度異常域の広がりとはほぼ一致しており、構造不均質に起因する摩擦特性の変化が滑り過程を制約している可能性が指摘された。また、図 8 に 2 次元 P 波速度構造とプレート境界及び本震の震源位置が示されているが、今回の地震の滑り量は、スラブー前弧マントル接触域に比べて、スラブー地殻接触域において特に大きかった可能性が高いことが推定された。さらに、図 8 には 3 月 9 日の前震とその余震分布も示されている。海溝軸から 30 km 程度の上盤側の P 波速度が極端に小さい領域ではほとんど微小地震活動が見られないが、この領域は海溝軸近傍における海底地殻変動観測などから非常に大きな地震時滑りがあったと推定される範囲 (東北大学 [課題番号：1202]) とほぼ一致しており、低 P 波速度を示す未固結堆積物の存在が、本震発生までは非地震的でありながら地震時に大きな滑りが発生したと深い関係にある可能性が示唆された。また、平成 22 年度までの成果として、想定宮城県沖地震の震源域の上盤側の前弧マントルにおいて、高 P 波速度、高 S 波速度、低 V_p/V_s 比という特徴を示すことが報告されていたが、今回の地震の滑り分布に関して、スラブーマントル接触域においては、宮城県沖地震の震源の範囲に極大をもつように見え、宮城県沖地震の破壊と同様に、前弧マントル内の不均質構造の影響を受けた滑り分布となっている可能性が指摘された (東北大学 [課題番号：1205])。

さらに、小・中繰り返し地震の解析から、余効滑りに伴い本震後地震数が多かったグループでは、本震以前に比べ繰り返し地震のマグニチュードが大きい傾向があることが分かった (東北大学 [課題番号：1205])。

関東地方における本震後の相似地震活動の解析により結果、東北地方太平洋沖地震の震源断層の延長にあたる太平洋プレート上面のみならず、フィリピン海プレート上面でも多数の相似地震が検出され、いずれのプレートでも、ほぼすべてのグループで本震後に相似地震の繰り返し間隔が短くなったことが明らかになった。これらのことは、フィリピン海プレートの存在する関東地方の下の広い範囲で、太平洋プレート及びフィリピン海プレート上面における非地震性滑り速度が加速したことを示唆している (防災科学技術研究所 [課題番号：3011])。

(フィリピン海プレートの構造と応力場)

低周波地震発生域を含む紀伊半島南部下の 3 次元地震波速度構造やプレート境界面の形状を詳細に把握するために、稠密自然地震観測と地殻構造探査で得たデータの統合解析により 3 次元速度構造等の推定が行われ、フィリピン海プレート (PHS) 上面に対応すると解釈できる反射面が確認されるとと

もに、そのPHS 上面より深部のPHS 内部におけるP 波速度や V_p/V_s 値は一樣ではなく、特に測線中央部下で V_p/V_s 値が大きくなる傾向があることが推定された(東京大学地震研究所[課題番号:1415])。また、プレート境界近傍で発生している極微小地震と深部低周波微動の発震機構解から、プレート境界における応力場の時空間分布を推定し、更に数値シミュレーションと組み合わせて、プレート境界の固着状態や応力集中域の推定を試みも継続されている(産業技術総合研究所[課題番号:5007])。

南海トラフにおいては、平成21 年度から、熊野灘沖での掘削が継続して行われており、巨大地震を引き起こす固着領域直上において、科学掘削としては初めてのライザー掘削を行うとともに、高精度地下構造探査等の実施によって、より正確な地下構造や物性に関するデータ取得が行われている(海洋研究開発機構[課題番号:4003])。

(フィリピン海プレートに伴う非地震性滑り)

房総半島南東沖において、2011 年10 月末頃にスロースリップが発生したが、GPS 連続観測によって検知された過去3 回(1996 年5 月、2002 年10 月、2007 年8 月)と継続時間、大きさともほぼ同程度であることが分かった(国土地理院[課題番号:6014])。

2009 年秋頃から発生していた豊後水道スロースリップは、2010 年末頃に終息し、過去2 回(1997 年頃と2003 年頃)と継続時間、大きさともほぼ同程度であったことが分かった。また、非定常地殻変動が明瞭な時期には、四国西部南東側で深部低周波微動の活発化が見られることが分かった(国土地理院[課題番号:6014])。

GPS 連続観測によって捉えられた中長期的なスリースリップは、房総半島南東沖、東海地方、豊後水道の3 領域に限られていたが、新たに日向灘においてもスロースリップが繰り返し発生していることが明らかとなった。2005 年以降、半年から1 年程度継続し、約2 年の周期で繰り返していることが分かった(図9)。スロースリップの滑り領域は、1996 年12 月の日向灘の地震の余効滑り領域の深部側とほぼ重なり、余効滑り域でスロースリップが発生し得ることが指摘された(国土地理院[課題番号:6014])。

西南日本のフィリピン海プレート上では、短期的スロースリップが繰り返し発生していることが、傾斜計もしくはひずみ計の記録の解析から報告されていた。今回新たにGPS 連続観測を用いて短期的スロースリップを検出する手法を考案し、短期的スロースリップの発生を示唆する地殻変動を検出することに成功した。過去15 年間のデータから88 個の断層モデルの推定を行うことができた(国土地理院[課題番号:6014])。

日向灘から足摺岬沖における浅部超低周波地震活動の詳細な時空間分布の解析により、浅部超低周波が活発となる一連の活動期の中でマイグレーションが見られることが明らかになった。その特徴は、西南日本において短期的SSE と同期して発生する深部低周波微動や深部低周波地震の活動に見られる特徴と類似しており、浅部超低周波地震もまた、プレート境界における未知の短期的SSE に伴って発生している可能性が示唆された(防災科学技術研究所[課題番号:3011])。

日向灘以南の南海トラフにおいても、精力的な観測研究が行われている。

DDトモグラフィ法を適用して日向灘における精度の良い震源分布、発震機構解と地震波速度構造が推定され、マントルウェッジにおける V_p/V_s 比は北から南に向かって値が小さくなる傾向が見られ、プレート間のカップリングと相関がある可能性が指摘された。また、1931 年(Mj7.1)と1961 年(Mj7.0)の日向灘地震の余震の震源再決定により、これらの地震の余震域が、1996 年10 月の地震(Mw6.8)及び1996 年12月(Mw6.7)の余震域と重なる可能性があることが推定された(九州大学[課題番号:2202])。

日向灘～トカラ列島東方沖～奄美大島域において、相似地震解析により、準静的滑り速度の空間分

布と時間変化についての成果が得られた（鹿児島大学 [課題番号：2301]）。準静的滑り速度の空間分布については、図10左に示されているように、1993年4月～2011年9月のデータから、種子島の東方あるいは東南東沖付近を境にして、南側の方が北側より平均的な速度は遅く、空間変化の波長は南側の方が長いこと、及び、南側の領域では、準静的滑り速度の遅い領域が海溝側に、速い領域が陸側に位置する傾向があることが推定された。このことは、この領域の固着域はプレート境界の比較的浅部にあることを意味している可能性がある。準静的滑り速度の時間変化については、図10右に、空間分布を参考にして全域を8つに小分けしたそれぞれの領域ごとの準静的滑り速度の時間変化が示されている。南側の3領域では準静的滑り速度の時間変化は小さく、安定した準静的滑りが継続しているのに対して、北側では時間的な変化が大きい（領域Dは比較的安定）。以上の準静的滑り速度の時間・空間変化の結果から、南側の領域では比較的広い領域にわたって固着域が存在するのに対し、北側では複数存在する小さな固着域が相互作用を繰り返している可能性が指摘された。

規模の大きな地震の波形を用いた震源解析によりアスペリティの分布の推定が行われ、奄美大島の北方海域で発生した2009年10月30日のM6.8の震源の深さが一元化震源より20km以上浅いことが推定された。この領域に展開している臨時地震観測点のデータ等による、この地震の前震・本震・余震の震源再決定でも同様の傾向が見られるとともに、余震の多くは本震より浅部で発生していることも明らかにされた。これらの結果は、GPS臨時観測点で捉えられた地震時変動ベクトルから推定した震源断層の深さと調和的であることが指摘された（鹿児島大学 [課題番号：2301]）。

ウ. ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

（ひずみ集中帯の成因）

北海道東部においてGPSデータからひずみ速度分布を推定し、屈斜路カルデラから阿寒カルデラにかけて特に大きな面積の縮小を示す一方、最大せん断ひずみは、面積ひずみほど集中しているようには見えないことが推定された（図11）。これらの結果は、北海道東部において太平洋プレートの沈み込みにより形成される広域的なひずみ場の中で屈斜路カルデラから阿寒カルデラにかけての地域が、ひずみが特に集中しやすい「ひずみ集中域」となっていることを示唆している。屈斜路カルデラ中心部のアトサヌプリ火山の直下の深さ5kmから20kmにかけて、3次元比抵抗モデリングにより低比抵抗異常が推定されたことはひずみ集中と関係している可能性がある（北海道大学 [課題番号：1103]）。

東北地方太平洋沖地震により、日本列島内陸のひずみ場が大きく変化した。日本海東縁部のひずみ集中帯に位置する新潟県上越地域における東西方向の地震前、地震時及び地震後地殻変動の東西方向のひずみ分布では、地震前に顕著な変形集中が見られていた部分において、地震後は特にひずみが集中している様子は見られないことが報告された（名古屋大学 [課題番号：1705]）。一方、佐渡市-阿賀町におけるGPS繰り返し観測からは、地震前にひずみ速度が大きかった部分で地震時の変化が大きかった可能性が指摘されている（国土地理院 [課題番号：6015]）。前者であれば、ひずみ集中帯で見られていた変形集中が弾性変形の結果ではなく、非弾性的な変形の結果であると考えられる。

新潟-神戸ひずみ集中帯内に位置する1891年濃尾地震の震源域において総合的観測が行われているが、2009年11月から2011年5月に得られたデータによる地震波トモグラフィ解析により、濃尾平野下の下部地殻はP波、S波とも周囲に比べ低速度であること、その中でも特に、濃尾地震の際に滑り量が大きかった温見断層直下の下部地殻の速度が遅いこと、図12に示されているように、モホ面直下の構造は濃尾地震の震源付近を境にその南東と北西で急激に変化していることなどが明らかにされた（東京大学 [課題番号：1407]）。浅発地震を用いたS波スプリッティング解析により、速いS波の偏向方向は概ね東西から北西-南東であり、新潟-神戸ひずみ集中帯を広域にわたって解析した

Hiramatsu et al. (2010) の結果と一致することが推定された。これは、この地域の地殻の異方性は広域応力場に支配されたクラックの選択配向により生じていることを示しており、波線長で正規化した時間差をGPS解析から得られた差ひずみ速度と比較すると、Hiramatsu et al. (2010) で報告されているひずみ集中帯における差ひずみ速度との比例関係と整合的な結果が得られ、差ひずみ速度に対応する速度で上部地殻に応力が蓄積していると考えられている（東京大学 [課題番号：1407]）。

応力テンソルインバージョン解析により、濃尾地震断層周辺の平均的な広域応力場が推定された。2009年5月から2010年10月までのM1.5以上、深さ30km以浅の地震約130個の震源メカニズム解から、ほぼ東西の σ_1 と応力比 $(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0.12$ という結果が得られ、濃尾地震断層周辺の広域応力場は東西方向の圧縮場が卓越していることが推定された（東京大学 [課題番号：1407]）。

さらに、前計画で行われた跡津川断層域の総合集中観測データの解析が継続された。3成分それぞれの波形を用いてコードQ値の解析により、新潟—神戸構造帯に対応するコードQの空間変化は低周波数帯で顕著であることなどが報告された（東京大学 [課題番号：1407]、名古屋大学 [課題番号：1705]）。

Nakajima and Hasegawa (2007) による上部地殻下部から下部地殻でのS波速度と相関が見られること（図13中）から、低周波数帯におけるコードQ値は地殻の脆性-延性遷移領域を反映したパラメータであると考えられている。Hiramatsu et al. (2010) による方法を用いて、コードQ値とGPS観測で得られた差ひずみ速度 (Sagiya et al., 2000) との関係から応力蓄積速度の空間変化量が推定された（図13下）。これらの値はJin and Aki (2005) の結果から推定された値 (13 ± 3.5 kPa) (Hiramatsu et al., 2010) より若干大きく、跡津川断層帯周辺地域では応力蓄積速度の空間変化量が新潟—神戸構造帯での平均的な値より大きい可能性が指摘された（東京大学 [課題番号：1407]、名古屋大学 [課題番号：1705]）。

さらに、跡津川断層への応力蓄積メカニズムを詳細に理解するために、堀内ら (2011) のアルゴリズムを用いて先行研究 (Katsumata et al. 2010) より多くの微小地震のメカニズム解を自動決定し、メカニズム解の深さ方向変化を調べた結果、断層深部ほど右横ズレ型が卓越する傾向が見られることが報告された。また、跡津川断層近傍の重力異常と地震分布を比較した。断層西部では重力異常の勾配は緩やかで地震もやや広がりを持って発生する一方、断層東部では重力異常の勾配が急で、地震は断層近傍に集中する傾向が見出された（東京大学 [課題番号：1407]）。

（内陸地震発生の準備過程）

東北地方太平洋沖地震の後、中部日本から東北日本にかけての領域において生じた顕著な内陸地震活動の変化は、基本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、より詳しくみてみるとその周囲や活動が低調であったところに起きているように見えること、メカニズム解と震源分布から推定された断層に対して計算される Δ CFFは正であることが報告された。さらに、東北沖地震前後の内陸域の応力場を調べた結果、東北地方北部と南部の一部地域で、本震の滑りによって形成されたと推定される応力場の変化がみられたが、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ことが指摘された（東北大学 [課題番号：1207]）。

稠密な地震観測網の展開されている東北地方中央部において、詳細な地震波減衰構造の推定を行い、地震波高減衰域が、脊梁や鳥海山などの火山付近の地震波低速度域や低比抵抗域 (Ichiki et al., AGU Fall Meeting, 2011 など) とよく対応すること、及び、東北地方太平洋沖地震後を含む内陸の微小地震活動、低周波地震、M6を超えるような大きな内陸地震のいずれも、高い圧力を持つ水などの流体を原因とする地震波の減衰域やその周囲に分布していることが指摘された（図14）。

せん断応力が小さい断層面について理論的な滑り方向と観測との差（ミスフィット角）の重みを小

さくする、新しい応力逆解析手法を2000年鳥取県西部合同観測データに適用することにより、断層近傍で発生した精度の良い1536個の地震メカニズム解から、本震による滑り量が大きい領域とその近傍の応力場が推定された。その結果、図15に示されているように、岩田・関口(2002)による大滑り域では本震による静的な応力変化の空間分布(白細線)と σ_1 の方位が一致しないが、その周辺よく一致することから、アスペリティは強度が大きく、アスペリティ周辺の強度が弱い領域において本震発生前に応力緩和が発生し、アスペリティに応力集中が発生して、大きな滑りが発生した可能性が指摘された(京都大学防災研究所[課題番号:1808])。

福岡県西方沖地震の合同余震観測データ等から決定された精度の高い発震機構解のデータを用い、広域応力とモーメントテンソルを用いて応力場不均質の検出が行われた。その結果、断層深部破壊開始点付近に本震のモーメントの数割に相当する滑りが発生していることが推定された(図16)。余震を用いたこの推定は本震発生後の状態を反映しているものであるが、GPSを用いた本震や余効変動モデルからは、この滑りは本震時もしくは発生後のものではなく、これは地震前に滑りを起こした可能性が示唆されており、地震発生前の滑りが本震破壊開始点付近で発生し、本震の破壊を引き起こす要因の一つとなった可能性が指摘された(九州大学[課題番号:2203])。

野島断層近傍の地表岩盤に設置されたアクロス震源の過去6回の連続運転(2000年1月~2001年4月,2003年3月~6月,2005年8月~9月,2007年11月~2008年5月,2009年9月~2010年1月,2010年11月~2011年1月)データの解析により、アクロス震源と800m孔底地震計の間の伝達関数からP波及びS波の走時と振幅の経年変化が推定された(図17)。その結果、P、S波走時ともにばらつきがあるものの、2000年~2012年にかけて約2ms(0.4%)速くなったことが確認された(京都大学防災研究所[課題番号:1807])。

エ. スラブ内地震の発生機構

関東下に沈み込むフィリピン海スラブ内の応力場の推定を行い、関東地震のアスペリティの領域を含む南西部のスラブマントルでは、 σ_1 及び σ_3 はプレートの傾斜方向に斜交し、関東地震のアスペリティの固着から期待される方向と調和的であること、1922年浦賀水道地震(M6.8)のP軸の方位は、現在の微小地震のメカニズム解のP軸、及び関東アスペリティの固着による σ_1 の方向とほぼ調和的であり、浦賀水道地震は関東アスペリティでの固着に関係したフィリピン海プレート内の地震であった可能性が極めて高いことが推定された(東北大学[課題番号:1208])。

2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)から約1か月後の4月7日に宮城県沖で発生したM7.1のスラブ内地震について、本震発生前の到着時刻データを用いて、震源域周辺の詳細な地震波速度構造を推定し、本震及び余震は低速度領域で発生していること、断層面とプレート表面とのなす角は約60度であることが明らかにされた(図18; Nakajima et al., 2011b; Ohta et al., 2012)。これらのことから、この地震の発生は以下のようなモデルで定性的に説明された(東北大学[課題番号:1208])。1) アウターライズでの正断層運動によってプレート内に水が取り込まれ、含水化した断層面が形成された。2) プレートの沈み込みに伴う温度・圧力の上昇によって脱水分解反応が起こり、断層面に高間隙圧水が供給された。3) 断層面での有効法線応力が低下し、面の強度が著しく低下した。4) 東北地方太平洋沖地震の地震時滑りによって断層面での剪断応力が増加し、地震が発生した。

長期観測型海底地震計最大27台(32観測点)を用いて紀伊半島東南海・南海地震震源域境界周辺で行われた繰り返し海域地震観測データの相互相関解析を行い、相対走時差をデータに加えてトモグラフィ解析を行った結果、紀伊水道から四国東部に沈み込むフィリピン海プレートの海洋性マントル最上部で発生する地震について明瞭な直線的分布が、その東側の紀伊半島下に沈み込むフィリピン

海プレート内では、数10 km 程度の規模のクラスター的な震源分布が決定された（図19）（東京大学 [課題番号：1418]）。紀南海山列等などの関係が注目される。

これまでの課題と今後の展望

東北地方太平洋沖地震の発生前まで、その震源域では、地震滑りが卓越する領域がパッチ状に分布しており、その周りは基本的には非地震性滑りを起こしていると考えられていた。地震滑りが卓越する領域は、近年発生した大地震の滑り分布から推定されており、そこは、「安定した」アスペリティであると考えられていた。「安定した」という言い方は、これらのアスペリティが連動してより大きな地震が起こることはあるが、アスペリティ領域とその周囲の非アスペリティ領域は、かなりはっきりと分かれる可能性が高いということを意味している。これが、「アスペリティモデル」と呼ばれる考え方であった。

地震準備過程の研究においても、これらのアスペリティは時空間的に安定したものと見なし、それに関する構造や応力場の特性を調べたり、その周辺の非地震性滑りの時空間変化を精度良く捉えようとしていた。

しかしながら、東北地方太平洋沖地震においては、パッチ状だと考えられていたアスペリティの周囲でも地震滑りが発生した。さらに、この地震は、それらパッチ状のアスペリティが単に連動したのではなく、海溝軸付近でこれまでの常識を一桁上回るような大きな地震滑りを起こしたものであることが分かってきた。そこで、より広い視点から大滑り域の構造を調査した結果、このような大スケールにおいても、大滑り域の断層直上の地震波速度は、その周囲に比べて相対的に大きい可能性が指摘された（東北大学 [課題番号：1205]）。一方、パッチ状のアスペリティの代表例である、想定宮城県沖地震の震源域では、東北地方太平洋沖地震の滑りがその部分で局所的なピークをもつように見え、今回の地震においても、マントルウエッジの数十km程度のスケールの局所的な不均質構造が滑りに影響している可能性が指摘された（東北大学 [課題番号：1205]）。つまり、断層近傍の媒質の性質が断層の滑り特性に影響することは、そのスケールに寄らず成り立っている可能性が示唆された訳である。これらの推定結果は大変重要であり、その妥当性の検証を進めるとともに、応力場等のマッピングにより、その実体に更に迫ることが重要であろう。

問題は、そのような広い領域において大きな地震滑りが起こる可能性、特に海溝近傍における可能性を考えていなかったことであるが、平成23年度には、この問題に関係する重要な知見がいくつか得られた。東北大学 [課題番号：1205] は、3月9日の前震及び引き続き活動が海溝軸の陸側30kmには及んでいないこと、及び、そこでの上盤側のP波速度が極端に小さいことを指摘している。さらに、東北大学 [課題番号：1206] では、その直ぐ西側あたりのプレート境界で、2008年にゆっくり地震が起こったことを推定している。また、海溝近傍にける海底地殻変動及び海底水圧観測結果から、海溝軸の極近傍で大きな余効滑りが起こっている可能性も指摘された（東北大学 [課題番号：1205]：東北大学 [課題番号：1206]）。これらの領域はいずれも東北地方太平洋沖地震で数十mを超えるような大滑りを起こしたと推定されているところであるが、従来は、これらの観測結果は、これらの領域が地震滑りを起こさないことを典型的に示していると解釈されていた訳である。これらの観測結果を十分に吟味するとともに、これまでに得られた知見を総合して、その意味することを明らかにすることが極めて重要である。IODPによる東北地方太平洋沖地震の震源断層への掘削により重要な知見が得られることが期待される。現時点でも言えることとしては、海溝近傍において上盤側の地震波速度が非常に小さいならば、弾性定数も同様かそれ以上に小さい可能性が高いので、応力降下量が小さくても大きなひずみを解放した可能性があることである。このことは、海溝沿いに必ずしも強度の大きな領域の存在

を考慮する必要がないことを示唆しているが、その領域でどうして大きな地震滑りが起こったかは依然として問題であり、断層面の摩擦特性や間隙水圧に加えて、上盤側の構造や物性も重要な研究対象の一つであると考えられる。

東北地方太平洋沖地震の震源域の周辺における今後の地震活動の推移が懸念されているが、北隣の1968年十勝沖地震及び1994年三陸はるか沖地震のアスペリティ内部では余震があまり発生していないことが指摘された(弘前大学 [課題番号: 1101])。一方、プレートの組み合わせが複雑になっている南隣においては、太平洋プレート及びフィリピン海プレートの上面において、非地震性滑りが加速している可能性が指摘された(防災科学技術研究所 [課題番号: 3011])。これらの領域における地震活動や非地震性滑りの時空間変化を注意深く見続ける必要がある。

その他の地域においては、日向灘で中長期的なスロースリップが発見されたことや四国から紀伊半島にかけての短期的スロースリップがGEONETのみによる解析で捉えられたこと(国土地理院 [課題番号: 6014])など、平成23年度においても、非地震性滑りの時空間変化に関する知見が多数得られた。特に、非地震性滑りの時空間変化のメカニズムを考える上で重要な観測結果がいくつか得られている。日向灘で観測された中長期的なスロースリップは、地震の余効滑り領域の深部側とほぼ重なっており、余効滑り域でスロースリップが発生する可能性が指摘された(国土地理院 [課題番号: 6014])。日向灘から足摺岬沖における浅部超低周波地震活動のマイグレーションが見出されたことから、浅部超低周波地震もまたプレート境界における未知の短期的SSEに伴って発生している可能性が示唆された(防災科学技術研究所 [課題番号: 3011])。関東地方の下のプレート境界において、東北地方太平洋沖地震の発生後に小繰り返し地震の活動が活発化し、非地震性滑り速度が増加した可能性が指摘された(防災科学技術研究所 [課題番号: 3011])。これらの観測結果は、プレート境界で生起している現象の全体像を明らかにする上で大変重要であり、観測結果の吟味とともに、それらのスローイベントの発生過程を明らかにすることがプレート境界における摩擦特性の解明において極めて重要である。

内陸地震に関しては、東北地方太平洋沖地震による応力場やひずみ速度場の擾乱を用いた研究が始まっている。まだ試験的な結果が得られている段階であるが、非常に稀にしか起こらない、しかも大きな振幅の擾乱であるため、これを最大限に活用することが重要である。内陸の応力場や間隙水圧、ひずみ集中帯の成因などの解明に資することが期待される。内陸地震に関する非均質構造の解明は、平成23年度も精力的な研究が続けられており、Q構造とひずみ速度の関係も指摘されており、今後の進展が期待される。

スラブ内地震については、東北地方太平洋沖地震の余震により、脱水脆性仮説を裏付ける明瞭な知見が得られた。関東地方のスラブ内の応力場と1923年関東地震やそれに伴う地震活動との関連も指摘されるなど、その発生過程の解明が進んでおり、今後の成果が大いに期待される。

成果リスト

Asano, Y., T. Saito, Y. Ito, K. Shiomi, H. Hirose, T. Matsumoto, S. Aoi, S. Hori, and S. Sekiguchi, 2011, Spatial distribution and focal mechanisms of aftershocks of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth, Planets and Space*, 63, 669-673.

浅野陽一, 2011, 濃尾地震震源域周辺における最近の地震活動, *地震ジャーナル*, 51, 29-36.

防災科学技術研究所, 2011, 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前震・余震のセントロイド・モーメントテンソル(CMT)解析結果, *地震予知連絡会会報*, 86, 153-155.

防災科学技術研究所, 2011, 東北地方太平洋沖地震以降の茨城県北部・福島県東部の地震活動, *地震予知連絡会会報*, 86, 338-339.

- 防災科学技術研究所, 2011, 東北地方太平洋沖地震以降の関東地方の相似地震活動, 地震予知連絡会会報, 86, 340-342.
- 防災科学技術研究所, 2011, 東北地方太平洋沖地震以降の銚子付近の地震活動, 地震予知連絡会会報, 86, 343-346.
- 防災科学技術研究所, 2011, 2011年3月11日以降の東京湾の地震活動, 地震予知連絡会会報, 86, 347-348.
- 防災科学技術研究所, 2011, 2011年3月15日静岡県東部の地震, 地震予知連絡会会報, 86, 425-426.
- 防災科学技術研究所, 2011, 2011年3月12日長野県・新潟県県境付近の地震, 地震予知連絡会会報, 86, 486-487.
- 防災科学技術研究所, 2012, 房総半島沖スロースリップイベント(2011年10-11月), 予知連会報, 87, 印刷中.
- Doan, M-L, et al., 2011, Quantification of free gas in the Kumano fore-arc basin detected from borehole physical properties: IODP NanTroSEIZE drilling Site C0009, *Geochem. Geophys. Geosyst.* doi:10.1029/2010GC003284.
- Ichihara, H., M. Uyeshima, S. Sakanaka, T. Ogawa, M. Mishina, Y. Ogawa, T. Nishitani, Y. Yamaya, A., Watanabe, Y. Morita, R. Yoshimura, and Y. Usui, 2011, A fault-zone conductor beneath a compressional inversion zone, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L09301, doi:10.1029/2011GL047382.
- Ichiki, M. et al., 2011, A magnetotelluric exploration to reveal three-dimensional electrical conductivity distribution of the upper mantle beneath Tohoku district, Northeastern Japan, AGU Fall Meeting.
- Ikari, M. and D.M. Saffer, 2011, Slip Behavior of Fault Systems in the Nankai Convergent Margin, *Geochem. Geophys. Geosyst.*
- Ikari, M. and D. Saffer, 2011, Permeability contrasts between sheared and normally consolidated sediments in the Nankai accretionary prism, *Marine Geology*, doi:10.1016/j.margeo.2011.11.006.
- Ikari, M., M. Strasser, D. Saffer, and A. Kopf, 2011, Submarine landslide potential near the megasplay fault tip at the Nankai subduction zone, *EPSL*, 10.1016/j.epsl.2011.10.024.
- Imanishi, K., N. Takeda, Y. Kuwahara, and N. Koizumi, 2011, Enhanced detection capability of nonvolcanic tremor using a 3-level vertical seismic array network, VA-net, in southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L20305, doi:10.1029/2011GL049071.
- 今西和俊・武田直人, 2011, 深部低周波微動の発生機構の解明を目指した紀伊半島における地上地震計アレイ観測, 活断層・地震研究センターニュース, No. 24, 1-5.
- Ito, Y., T. Tsuji, Y. Osada, M. Kido, D. Inazu, Y. Hayashi, H. Tsushima, R. Hino, and H. Fujimoto, 2011, Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G05, doi:10.1029/2011GL048355.
- 海上保安庁, 2011, 海底地殻変動観測結果から得られた平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震発生前後の海底の動き, 地震予知連絡会会報, 86, 284-293.
- 海上保安庁, 2011, 海上保安庁のGPS/A観測システムとその成果, 地震予知連絡会会報, 86, 626-631.
- 海上保安庁, 2011, 南海トラフにおける海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 87, 印刷中.
- 海上保安庁, 2011, 海底地殻変動観測結果から得られた平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震発生前後の海底の動き, 地震予知連絡会会報, 87, 印刷中.
- Kido, M., Y. Osada, H. Fujimoto, R. Hino, and Y. Ito, 2011, Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L24303, doi:10.1029/2011GL050057.
- Kinoshita, M., G. Moore, and Y. Kido, 2011, Heat flow estimated from BSR and IODP borehole data: Implication of

- recent uplifting of the imbricate thrust zone in the Nankai Trough off Kumano, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, doi:10.1029/2011GC003609.
- 古賀祥子・伊藤喜宏・日野亮太・篠原雅尚・海野徳仁, 2012, 日本海溝周辺における太平洋プレート内の地震発生機構, *地震* 2, 64, 75-90.
- 国土地理院, 2011, 東北地方の地殻変動, *地震予知連絡会会報*, 86, 184-272.
- 国土地理院, 2011, 中国・四国地方の地殻変動, *地震予知連絡会会報*, 86, 542-558.
- 国土地理院, 2011, 九州・沖縄地方の地殻変動, *地震予知連絡会会報*, 86, 570-576.
- 国土地理院, 2011, GPS による短期的スロースリップイベント (SSE) 検出の可能性, *地震予知連絡会会報*, 85, 510-516.
- Kosuga, M., and K. Watanabe, 2011, Seismic activity around the northern neighbor of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake with emphasis on a potentially large aftershock in the area, *Earth Planets Space*, 63, 719-723.
- Kumagai, H., N. Pulido, E. Fukuyama, and S. Aoi, 2012, Strong localized asperity of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Japan, *Earth Planets Space*, in press.
- Li, Chun-Feng, 2011, An integrated geodynamic model of the Nankai subduction zone and neighboring regions from geophysical inversion and modeling, *Journal of Geodynamics*, doi: 10.1016/j.jog.2010.08.003.
- Lin, W., O. Tadai, T. Hirose, W. Tanikawa, M. Takahashi, H. Mukoyoshi, and M. Knoshita, 2011, Thermal conductivities under high pressure in core samples from IODP NanTroSEIZE drilling site C0001, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, doi:10.1029/2010GC003449.
- Moore, J. C., C. Chang, L. McNeill, M. K. Thu, Y. Yamada, and G. Huftile: Growth of borehole break-outs with time after drilling, 2011, Implications for state of stress, NanTroSEIZE transect, SW Japan, *Geochem. Geophys. Geosyst.* doi:10.1029/2010GC003417.
- Nakajima, J., A. Hasegawa, and F. Hirose, 2011a, Stress regime in the Philippine Sea slab beneath Kanto, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L16318, doi:10.1029/2011GL048754.
- Nakajima, J., A. Hasegawa, and S. Kita, 2011b, 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.
- Nishimura, T., H. Munekane, and H. Yurai, 2011, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its aftershocks observed by GEONET, *Earth Planets Space*, 63, 631-636, doi:10.5047/eps.2011.06.025.
- Shibazaki, B., T. Matsuzawa, A. Tsutsumi, K. Ujiie, A. Hasegawa, and Y. Ito, 2011, 3D modeling of the cycle of a great Tohoku-oki earthquake, considering frictional behavior at low to high slip velocities, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21305, doi:10.1029/2011GL049308.
- Tsuji, T., Y. Ito, M. Kido, Y. Osada, H. Fujimoto, J. Ashi, M. Kinoshita, and T. Matsuoka, 2011, Potential Tsunamigenic Fault of the 2011 Off-Tohoku Earthquake, *Earth Planet Space*, 63, 831-834.
- Obana, K., G. Fujie, T. Takahashi, Y. Yamamoto, Y. Nakamura, S. Kodaira, N. Takahashi, Y. Kaneda, and M. Shinohara, 2011, Normal-faulting earthquakes beneath the outer slope of the Japan Trench after the 2011 Tohoku earthquake: Implications for the stress regime in the incoming Pacific plate, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L00G25, doi:10.1029/2011GL050399.
- Yamamoto, Y., R. Hino, and M. Shinohara, 2012, Mantle wedge structure in the Miyagi Prefecture forearc region, central northeastern Japan arc, and its relation to corner-flow pattern and interplate coupling, *J. Geophys. Res.*, 116, B10310, doi:10.1029/2011JB008470.

- 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, 2012, 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 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, 2012, 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., 2011, 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.
- Ozawa, S., T. Nishimura, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire, 2011, Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, *Nature*, 475, 373-376, doi:10.1038/nature10227.
- Pulido, N., Y. Yagi, H. Kumagai, and N. Nishimura, 2011, Rupture process and coseismic deformations of the 27 February 2010 Maule Earthquake, Chile, *Earth Planets Space*, 63, 955-959.
- Sakaguchi, A., F. Chester, D. Curewitz, O. Fabbri, D. Goldsby, G. Kimura, Chun-Feng Li, Y. Masaki, E. J. Screaton, A. Tsutsumi, K. Ujiie, and A. Yamaguchi, 2011, Seismic slip propagation to the up-dip end of plate boundary subduction interface faults: Vitritite reflectance geothermometry on Integrated Ocean Drilling Program NanTroSEIZE cores, *Geology*, doi:10.1130/G31642.1.
- Sakaguchi, A., G. Kimura, M. Strasser, E. Screaton, D. Curewitz, and M. Murayama, 2011, Episodic seafloor mud brecciation due to great subduction zone earthquakes, *Geology*, doi:10.1130/G32043.1.
- Satoshi M., K. Uehira, T. Matsushima, and H. Shimizu, 2012, Modeling heterogeneous deviatoric stress field around the hypocentral area of the 2005 Fukuoka earthquake (M7.0) by spatially distributed moment tensors, *J. Geophys. Res.* (in press).
- Sato, M., T. Ishikawa, N. Ujihara, S. Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki, and A. Asada, 2011, *Science*, 332,1395, doi:10.1126/science.1207401.
- Shinohara, M., T. Yamada, K. Nakahigashi, S. Sakai, K. Mochizuki, K. Uehira, Y. Ito, R. Azuma, Y. Kaiho, T. No, H. Shiobara, R. Hino, Y. Murai, H. Yakiwara, T. Sato, Y. Machida, T. Shinbo, T. Isse, H. Miyamachi, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, Y. Kaneda, K. Hirata, S. Yoshikawa, K. Obara, T. Iwasaki, and N. Hirata, 2011, Aftershock observation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake by using ocean bottom seismometer network, *Earth Planets Space*, 63, 835-840.
- Suito, H., T. Nishimura, M. Tobita, T. Imakiire, and S. Ozawa, 2011, Interplate fault slip along the Japan Trench before the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake as inferred from GPS data, *Earth Planets Space*, 63, 615-619, doi:10.5047/eps.2011.06.053.
- 水藤尚・西村卓也・小沢慎三郎・小林知勝・飛田幹男・今給黎哲郎・原慎一郎・矢来博司・矢萩智裕・木村久夫・川元智司, 2011, GEONET による平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴う地震時の地殻変動と震源断層モデル, *国土地理院時報*, 122, 29-37.
- 水藤尚・西村卓也・小沢慎三郎・飛田幹男・原慎一郎・矢来博司・矢萩智裕・木村久夫・川元智司, 2011, GEONET による平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に引き続いて発生している余効変動と余効すべりモデル, *国土地理院時報*, 122, 39-46.
- Tsuji, T., R. Hino, Y. Sanada, K. Yamamoto, J-O. Park, T. No, E. Araki, N. Bangs, R. Huene, G. Moore, and M. Kinoshita, 2011, In situ stress state from walkaround VSP anisotropy in the Kumano basin southeast of the Kii Peninsula, Japan, *Geochem. Geophys. Geosyst*, doi:10.1029/2011GC003583.

- Uchida, N., T. Matsuzawa, W. L. Ellsworth, K. Imanishi, K. Shimamura, and A. Hasegawa, 2012, Source parameters of microearthquakes on an interplate asperity off Kamaishi, NE Japan over two earthquake cycles, *Geophys. J. Int.*, in press.
- Ujii, K., A. Tsutsumi, and J. Kameda, 2011, Reproduction of thermal pressurization and fluidization of clay-rich fault gouges by high-velocity friction experiments and implications for seismic slip in natural faults, in *Geology of the earthquake source*, The Geological Society Books.
- 白井嘉哉・上嶋誠・小河勉・吉村令慧・大志万直人・山口覚・藤浩明・村上英記・宇都智史・兼崎弘憲・望戸裕司・相澤広記・丹保俊哉・最上巴恵・小川康雄・西谷忠師・坂中伸也・三品正明・佐藤秀幸・後藤忠徳・笠谷貴史・茂木透・山谷祐介・原田誠・塩崎一郎・本蔵義守・小山茂・望月裕峰・中尾節郎・和田安男・藤田安良, 2011, 新潟－神戸ひずみ集中帯における深部比抵抗構造－広帯域MT 法とネットワークMT 法のジョイントインバージョン－ Conductivity Anomaly 研究会2010年論文集, 41-47.
- Yabe, Y. and K. Omura, 2011, In-situ stress at a site close proximity to the Gofukuji Fault, central Japan, measured using drilling cores, *Island Arc*, 20, 160-173, doi:10.1111/j.1440-1738.2010.00756.x.
- Yamada, T., K. Nakahigashi, A. Kuwano, K. Mochizuki, S. Sakai, M. Shinohara, R. Hino, Y. Murai, T. Takanami, and T. Kanazawa, 2011, Spatial distribution of earthquakes off the east coast of Kanto region along the Japan Trench deduced from ocean bottom seismographic observations and its relations with aftershock sequence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 841-845.
- Yamada, Y., L. McNeill, J.C. Moore, and Y. Nakamura, 2011, Structural styles across the Nankai accretionary prism revealed from LWD borehole images and their correlation with seismic profile and core data: results from NanTroSEIZE Stage 1 expeditions, *Geochem. Geophys. Geosyst*, doi:10.1029/2010GC003365.
- Yamamoto, Y., R. Hino, and M. Shinohara, 2011, Mantle wedge structure in the Miyagi Prefecture forearc region, central northeastern Japan arc, and its relation to corner-flow pattern and interplate coupling, *J. Geophys. Res.*, 116, B10310, doi:10.1029/2011JB008470.
- Yokota, Y., K. Koketsu, Y. Fujii, K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa, 2011, Joint inversion of strong motion, teleseismic, geodetic, and tsunami datasets for the rupture process of the 2011 Tohoku earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G21, doi:10.1029/2011GL050098.
- Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Okada, T. Iinuma, Y. Ito, and Y. Asano, 2011, Stress before and after the 2011 Great Tohoku-oki earthquake, and induced earthquakes in inland areas of eastern Japan, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2011GL049729, in press.
- Zhao, D., Z. Hang, N. Umino, A. Hasegawa, and H. Kanamori, 2011, Structural heterogeneity in the megathrust zone and mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0), *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17308, doi:10.1029/2011GL048408.

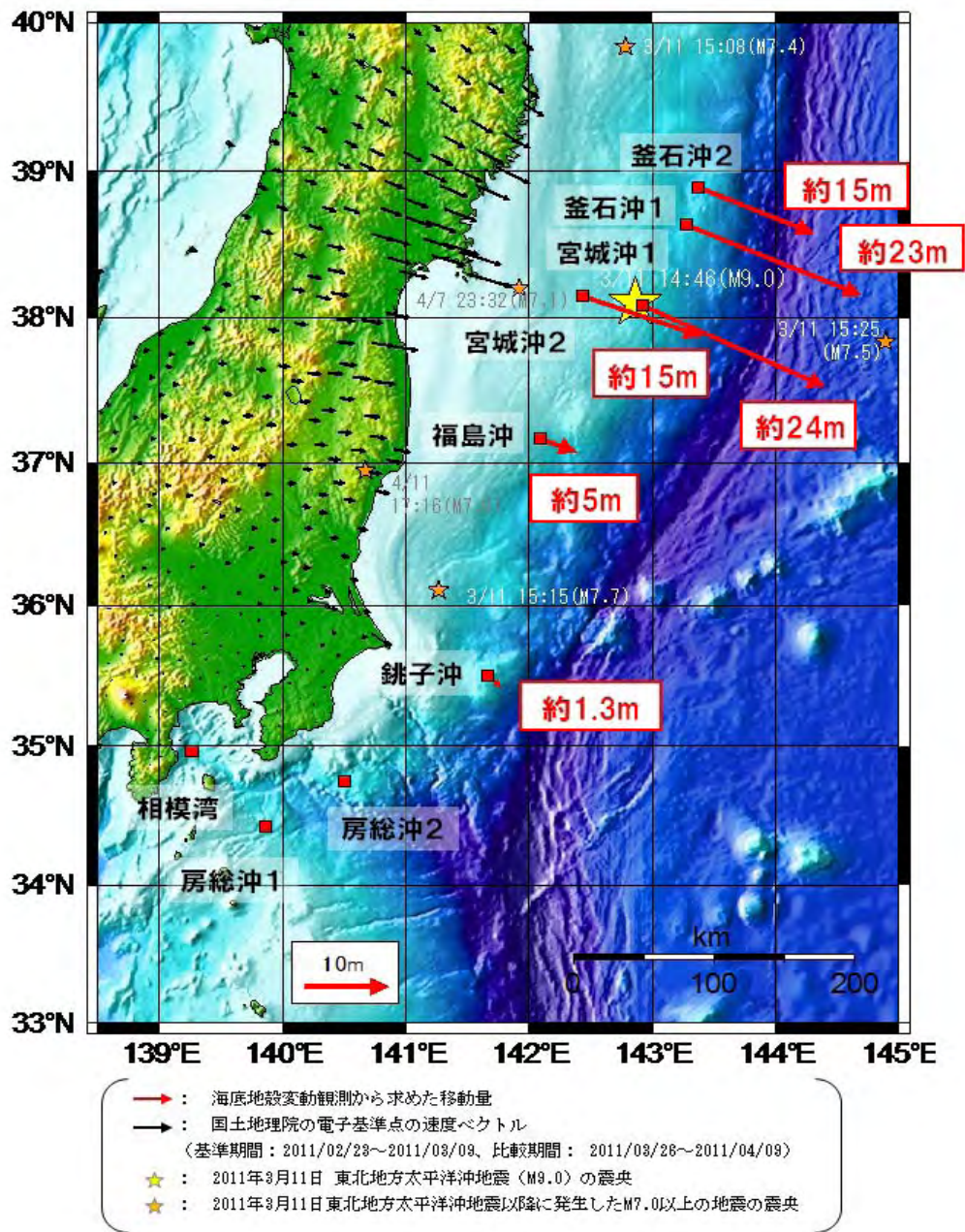


図1. 東北地方太平洋沖地震に伴う海底の動き（水平成分）（海上保安庁水路部 [課題番号：8006]）。

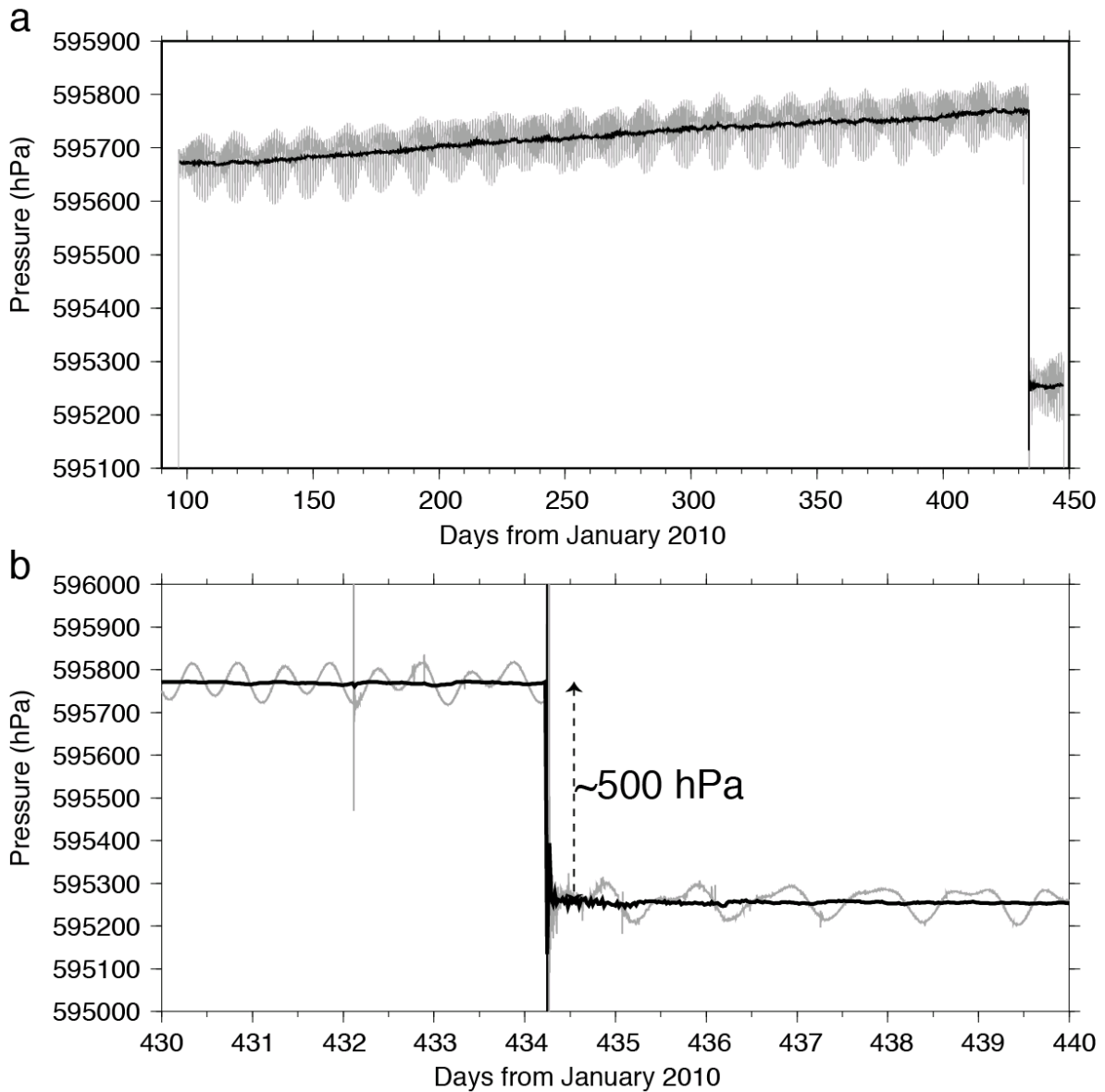


図2. 海溝軸から約20 km 陸側の海底水圧計(TJT1)で観測された海底水圧記録。灰色線は観測された生の記録, 黒線は観測された生の記録から海洋潮汐成分を取り除いた記録を世界標準時で示す。(a) 観測開始から観測終了までの約350日間の圧力記録。(b) 3月7日から17日までの圧力記録。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の地殻変動による500hPaの圧力減少が記録されている(東北大学[課題番号:1206])。

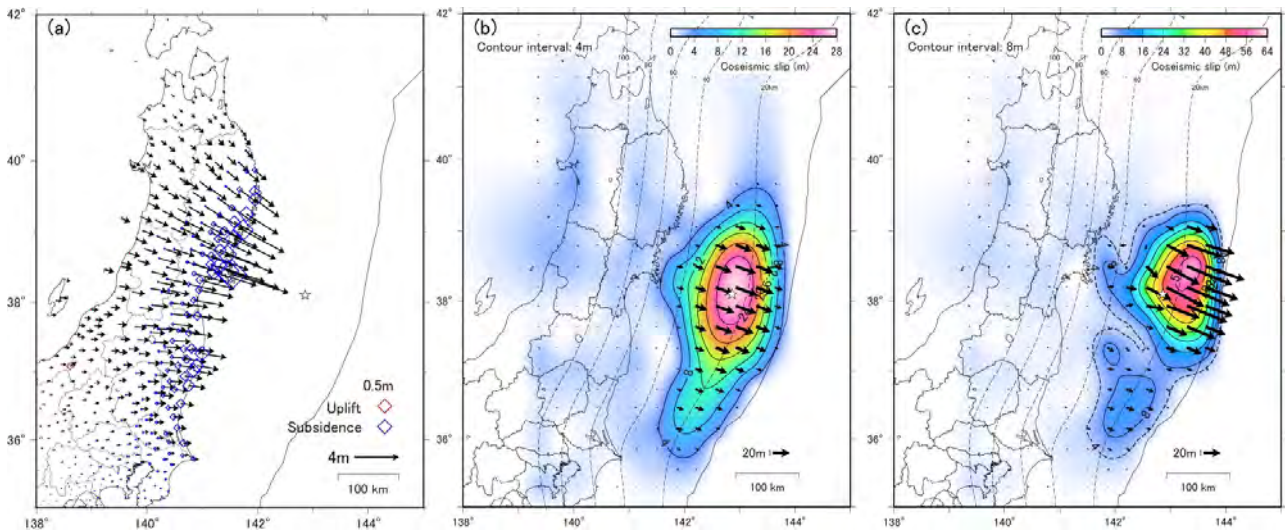


図3. GEONET による東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動と本震時の滑り分布。(a)GEONET による本震に伴う地殻変動。(b)GEONET データから推定した本震時の滑り分布。(c)GEONET データと海上保安庁による海底地殻変動観測点5 点分のデータから推定した本震時の滑り分布(国土地理院 [課題番号: 6014])。

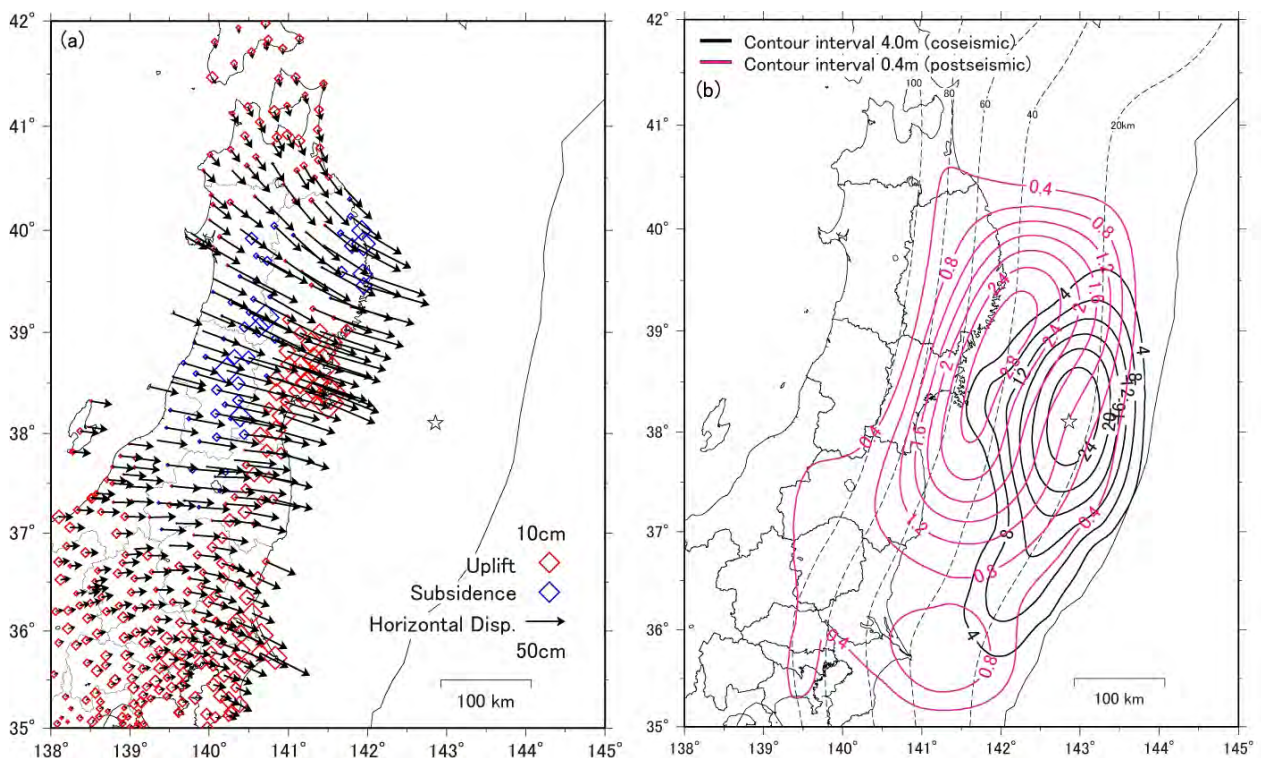


図4. 東北地方太平洋沖地震後の余効変動と余効滑り分布。2011年3月11日18時～2012年1月29日18時までのデータ。(a)GEONET による余効変動。(b)余効滑り分布とGEONETのデータから推定された本震時の滑り分布との比較(国土地理院 [課題番号: 6014])。

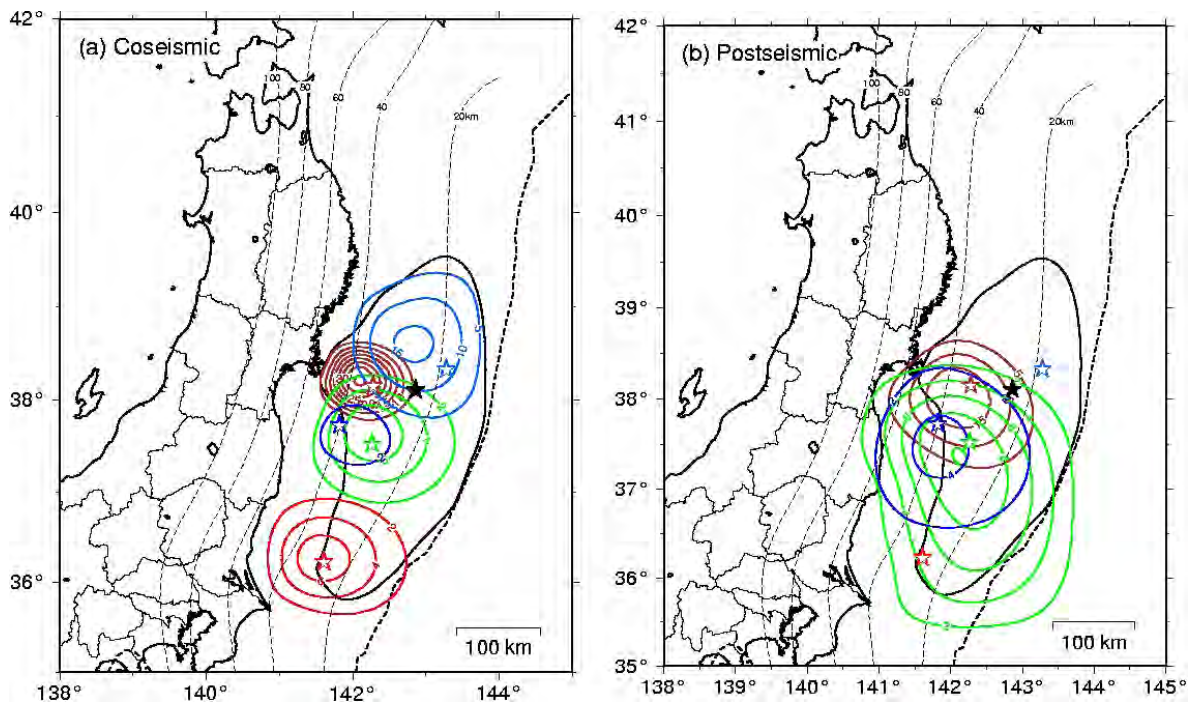


図5. 東北地方太平洋沖地震前に発生したM7クラスの地震の地震時及び地震後の滑り分布と東北地方太平洋沖地震の震源域の比較。(a) 地震時の滑り分布, (b) 地震後の滑り分布 (2011年三陸沖の地震は除く)。青: 2005年宮城県沖の地震, 赤: 2008年茨城県沖の地震, 緑: 2008年福島県沖の地震, 紺: 2010年福島県沖の地震, 青: 2011年三陸沖の地震 (国土地理院 [課題番号: 6014])。

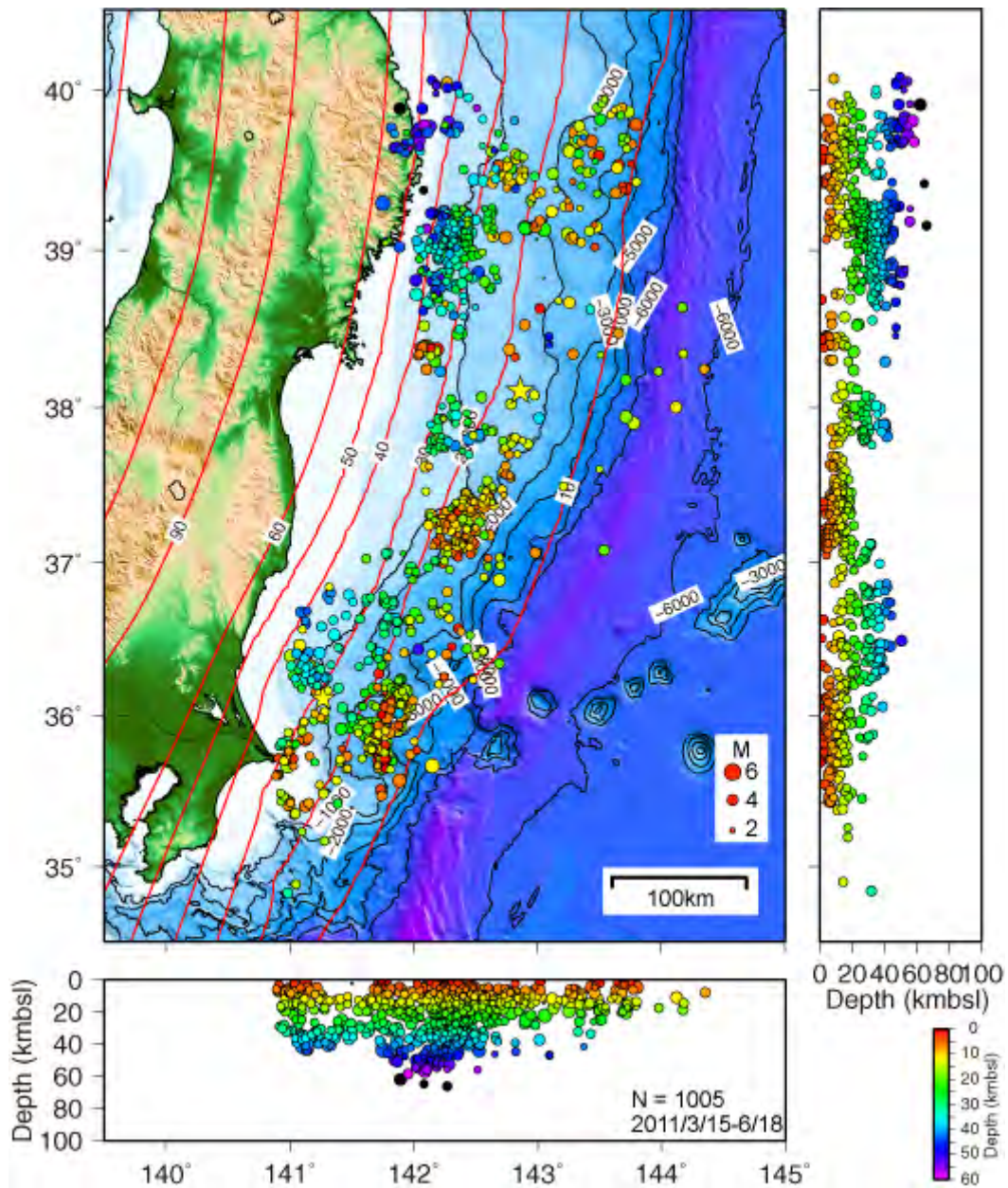


図6. OBS データより求められた余震分布（平成23年3月15日-6月18日）。○が余震の震源位置を表す。色は深さを表し、大きさはマグニチュードを表している。赤いコンターは、過去の海底観測により求められているプレート境界の深さを表す（東京大学地震研究所〔課題番号：1416〕）。

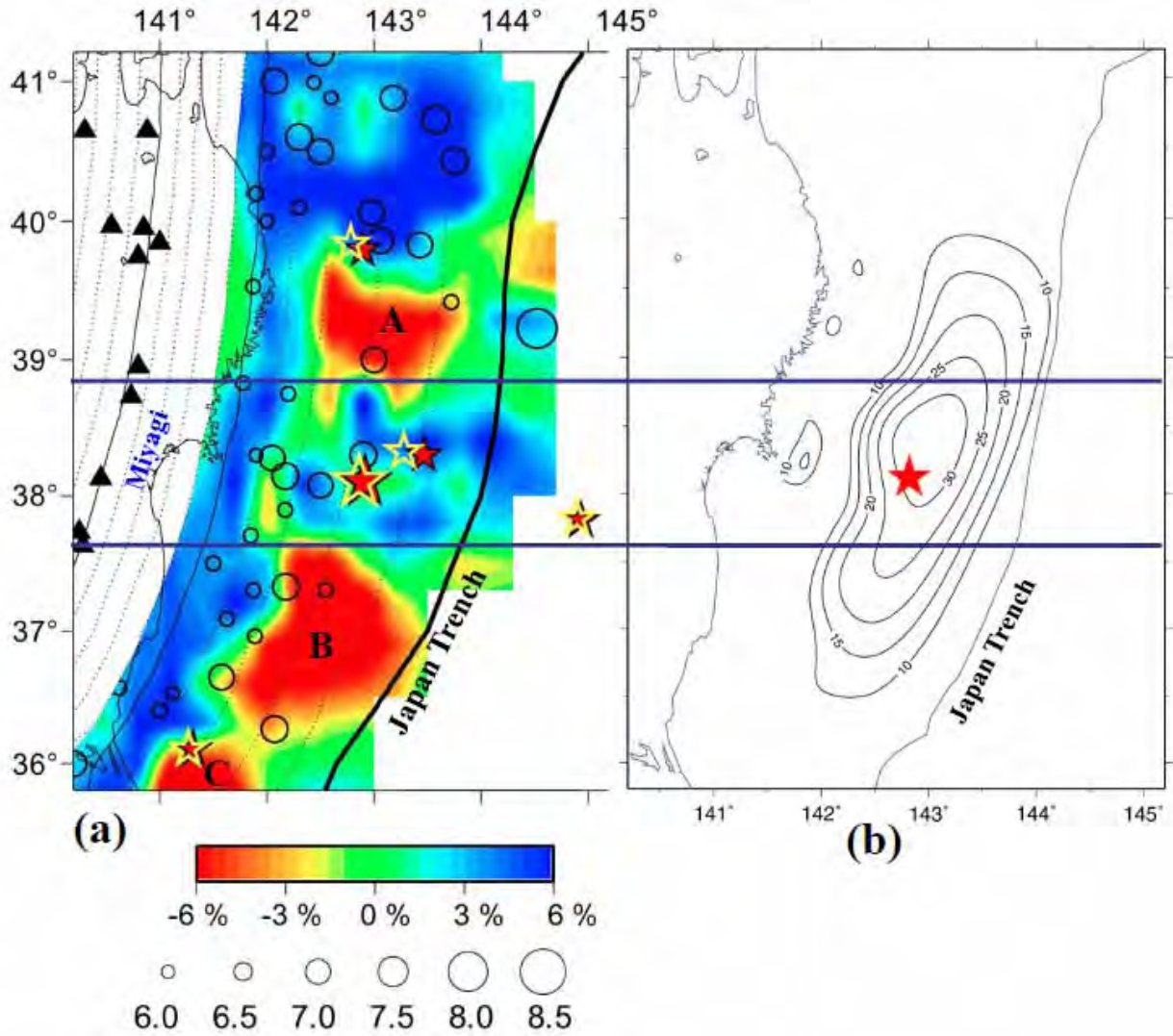


図7. a) 東北地方太平洋側のプレート境界面直上におけるP波速度異常の分布 (Zhao et al., GRL, 2011)。A, B, C に顕著な低速度異常が認められる。○は1900~2008年に発生したM6以上の地震の震央。星印は前震, 本震と3月11日に発生した大きな余震の震央で赤が再決定したもの, 黄色は気象庁によるもの。 (b) 本震時の滑り量分布 (内田・飯沼, 2011)。星印は本震の震央 (東北大学 [課題番号: 1205])。

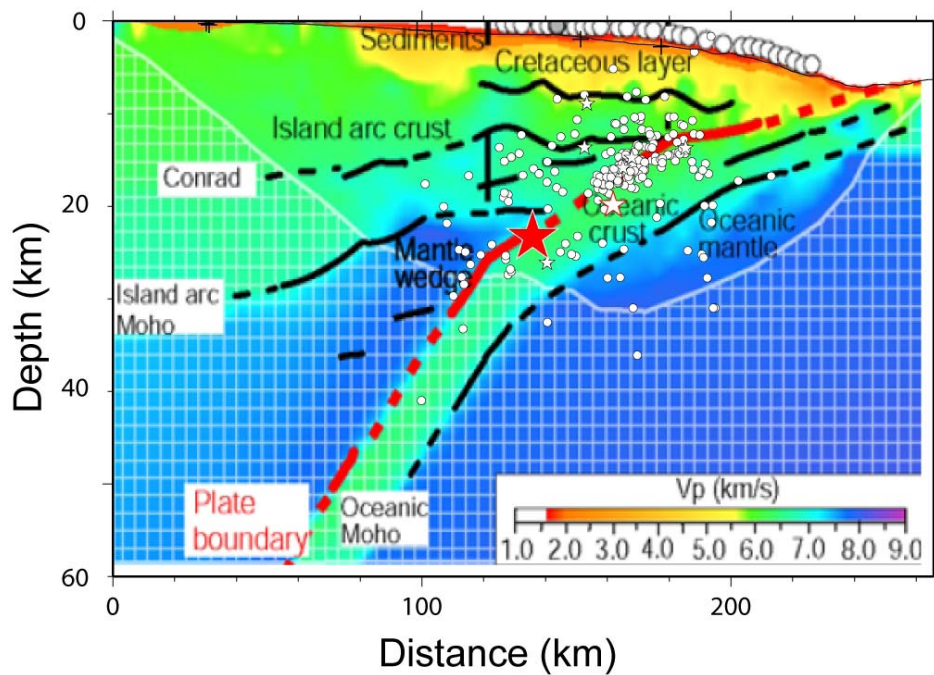


図8. 海底地震計のデータを用いて再決定した3月9日の前震（白星）とその余震（白丸）及び3月11日の本震（赤星）の震源深さ分布（Hino et al., AOGS, 2011）。背景は人工地震探査による前震一本震活動域における2次元P波速度構造モデル（Ito et al., GRL, 2004）（東北大学〔課題番号：1205〕）。

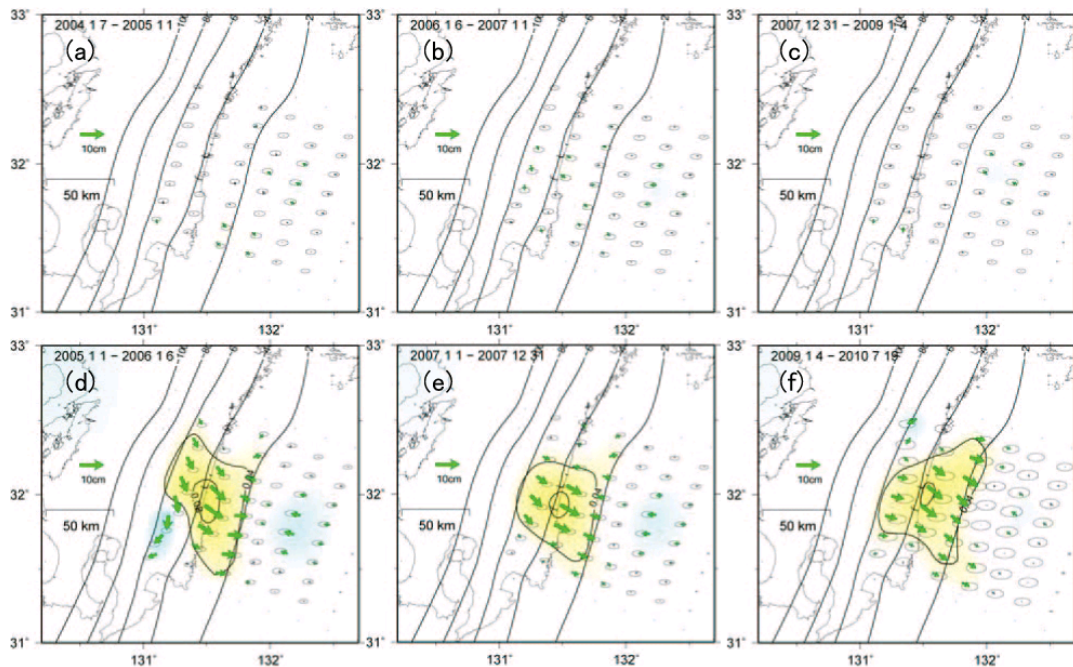


図9. 日向灘で発生したスロースリップの滑り分布。2005年以降(d)～(f)の期間で繰り返し発生。(a)～(c)は発生していない期間（国土地理院〔課題番号：6014〕）。