

## 5. 超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進

超巨大地震計画推進部会長 谷岡勇市郎

平成 21 年度から始まった「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」では、平成 23 年に発生した東北地方太平洋沖地震のような M9 クラスの超巨大地震の発生予測の観測研究の推進が十分ではなかった。そのため観測研究計画が見直され、平成 24 年度から新たに、超巨大地震の発生機構とそれに起因する現象を解明する観測研究、及び超巨大地震やそれに起因する現象を予測するための観測研究、さらにはこれらの解明と予測のための観測研究に必要な新技術の開発を行う研究が実施されることとなった。本報告では平成 24 年度の成果を概観する。

### (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

#### ア. 超巨大地震の発生サイクルの解明

発生間隔の長い超巨大地震の発生サイクルを理解するためには、まず、地形変動的、古地震学的、地質学的手法から得られたデータを地球物理学的に解析する必要がある。

北海道太平洋沿岸の釧路市周辺における津波堆積物調査を実施した。釧路市鶴野の湿地（海岸線から1.5～2km付近）に少なくとも2層の津波砂層（TS1およびTS2）が存在することが分かった。TS1は樽前b火山灰（T西暦1667年）の下位数cmに、TS2は白頭山苫小牧火山灰（約1000年前）の上位数cm～10cmの位置に存在する。TS1およびTS2はいずれも海岸から2120m地点（標高5.9m）まで識別できた。昨年度までに調査した浦幌、キナシベツ、音別、厚岸、根室では、いずれも同時期に2層の津波堆積物が存在する。釧路市鶴野で記載したTS1およびTS2も、この2層にそれぞれ対比され、広範囲の巨大津波が発生していたと思われる（北海道大学[課題番号：1002]）。これまで、北海道太平洋沖で発生した地震による17世紀の巨大津波を説明する断層モデルは十勝沖と根室沖の連動型のプレート境界型地震(Mw8.5)と考えられてきた。今年度、最新の津波堆積物調査結果を含む北海道太平洋沿岸の11地域での津波到達範囲・地点をデータとし、それらを全て説明できる断層モデルを推定した。その結果、今までの断層モデルに加えて、海溝近傍のプレート境界浅部の幅30kmの断層で、25mにも及ぶ滑りが生じていたことが明らかになった（図1）。17世紀の巨大地震の地震モーメントは $1.7 \times 10^{22}$ Nm (Mw8.8) と推定された。このことは、2011年東北地方太平洋沖地震と同様に、17世紀の巨大地震により北海道太平洋沖の海溝近傍浅部においてプレート境界が非常に大きくすべったことを示す重要な研究成果である（北海道大学[課題番号：1002]）。

津波堆積物の変質・保存過程を明らかにするため、青森県三沢海岸に分布する2011年東北地方太平洋沖地震による津波堆積物について、津波発生後1年の時点での層相、層厚、堆積物分布、被覆層の有無を調べた。その結果、津波発生から1年経過した時点で、津波堆積物の分布域は、実際の堆積域・津波浸水域より狭くなっており、「古津波堆積物」の分布域を津波の浸水域と考えると、津波の規模を過小評価する可能性があることが分かった（図2）（北海道大学[課題番号：1002]）。

日本海溝沿いでは津波堆積物の検出のため沿岸低地において、ボーリングやジオスライサーによる地層のコア採取を行うとともに、仙台湾では海底表層の地層のコア採取を実施した。また、房総半島南部沿岸において、地殻変動の解析を目的とした航空レーザー計測による地形データを取得した。南海トラフ沿いでは、津波堆積物と地殻変動の検出を目的としたボーリング及びジオスライサー調査を静岡県沿岸から和歌山県沿岸にかけて実施した。さらに、和歌山県串本町では地上レーザー計測を用いて津波石の分布を正確に把握した(産業技術研究所[課題番号：5006])。

南海トラフ沿いの超巨大地震の発生履歴を明らかにするために、名古屋大学が所蔵する高木家文書(西高木家)のうち「御用日記」で安政東南海・南海地震に関する日記の修復を行った。現在翻刻中であるが、蓬左文庫にある高木家文書(東高木家)よりも安政東海・南海地震についての記載が多いことがわかった。また、徳川林政史研究所の調査を行いデータベース化した。高知県神社明細帳によると、宇佐地域の神社の多くが宝永地震の津波で流されているが、安政地震に関する記載は全く出て来ないなど、高知県では安政地震の津波被害の記載が全体的に少ないことがわかった。一方、和歌山県では安政でも宝永でも同程度の被害が生じていたことが示された(名古屋大学[課題番号：1709])。

## イ. 超巨大地震の発生とその前後の過程の解明

ここでは、2011年東北地方太平洋沖地震に先行した地震活動や地殻変動の特徴を調査し、超巨大地震発生の準備過程を理解するとともに、地震発生後の海域での観測等による地震時大滑りの実体の解明や地震後の地震活動や地殻変動とそれに伴う応力の再配分に関する観測研究を実施した。

東北地方太平洋沖地震の余震の震源位置を正確に決定することは、本震の震源断層の位置、形状を正確に捉えるために必要である。また、余震活動の時空間変化を調べることで、本震の破壊様式や今後の余震活動の推移を推定するための重要な情報となる。そのために、海域の震源域直上に自己浮上式海底地震計を多数設置し、余震分布を高精度に決定した。その結果、深さ方向の誤差が3km以下、水平方向の誤差が5km以内の1210個の余震の震源を決定することができた

(図3)。海底地震計観測網で決められた余震分布に基づく、海溝から日本列島に向かって、震源の深さは全体的に深くなる。しかしながら、プレート境界以外にも、陸側プレート内に活発な活動が見られる。深さ約25kmよりも深いプレート境界付近で発生している余震は、海洋プレートの沈み込みを示す逆断層型の発震機構解を呈する地震が多いが、陸側プレート内の地震は、正断層型または横ずれ型の発震機構解を持つ地震が卓越する。また、本震時に大きな滑りが推定されている本震の初期破壊開始点付近では、余震活動が低調である。海溝軸付近においても、地震活動は低調であるが、巨大津波の発生域であると推定されている宮城県はるか沖の海溝軸付近には、海洋プレート内で余震が発生している。また、海溝より海側では、正断層型の地震が多数発生していることが、海底観測より明らかとなった。陸側プレート内の余震活動が、本震発生以前に比べ、活発になったことと比べ、陸側斜面下の海洋プレート内の活動度は、それほど変化していないように見える。沈み込む海洋プレートは、深さ25km付近で沈み込み角が大きくなるが、

余震域の端がこの折れ曲がり点とほぼ一致している。折れ曲がり点より深いプレート境界では、余震が多く発生していることもわかる。プレート境界付近の余震発生域の南限は、本震時の滑り域と概ね一致しており、本震の破壊がこの付近で停止したことが考えられる（東京大学地震研究所[課題番号：1443]）。

CMT解を用いて東北地方太平洋沖地震前後の上盤プレート内の応力場を推定した（図4）。地震前は、 $\sigma_1$ 軸の方位が地震時の大滑り域に集中するような分布を示し、一方、地震後は、 $\sigma_3$ 軸の方位が地震時の大滑り域に向かう特徴を示した。このことは、地震時の大滑り域が地震前に固着していたこと、地震時の滑りにより蓄積されていた応力がほぼ解放されたことを示唆する。これは、地震前の応力が地震時に解放された静的応力変化よりも小さい（ $<5\sim 25\text{MPa}$ ）ことを意味し、高い間隙流体圧等がその要因として考えられる（東北大学[課題番号：1219]）。

また、東北地方太平洋沖地震の発生直前のプレート境界面上の固着状況を明らかにするために、海上保安庁水路部による海底地殻変動観測データを解析した。周辺に発生したM7前後の地震とその余効変動の影響を考慮すると、宮城沖1・2の観測点付近において、本震発生の数年前以降においては、ほぼ100%の滑り欠損レートが推定された。ただし、海溝付近における滑り欠損レートについては、より海溝付近の海底地殻変動観測データを解析する必要があるため、今後の検討が欠かせない。さらに、地震時滑りが起きた領域の下端付近におけるプレート境界断層の強度を推定した。F-netによる余震のメカニズム解のP軸は、宮城県沖の地震滑り域の下端付近において、上盤側では鉛直方向を向くものに対して、下盤側ではプレート境界に平行な分布を示す。また、より深部においては、P軸はプレート境界断層の滑りに調和的な方向となる。このようなP軸の空間分布を説明するためには、余効滑りが起こった領域において、断層の強度が10MPa程度以上必要であることが示された。また、本震の動的破壊過程に関して、thermal pressurizationが重要な役割を果たしている可能性も指摘した（京都大学防災研究所[課題番号：1815]）。

約30年間にわたる小繰り返し地震データを用いて、東北地方太平洋沖地震発生前後の小繰り返し地震の活動度の変化と、プレート境界の非地震性滑りの時空間分布を推定した。太平洋プレート上面の小繰り返し地震グループの活動に注目してみると、地震時に大きく滑った領域では、小繰り返し地震が地震後にほとんど起きていないことが明らかとなった（図5a）。この結果は、繰り返し地震と判定するコヒーレンスの基準を下げても変わらず（図5b）、媒質や震源過程の変化で波形の相似性が悪化したため、繰り返し地震と判定できなくなったわけではないことが確かめられた。このような小繰り返し地震の活動停止の原因の1つとして、東北地方太平洋沖地震の滑り域での応力解放が考えられる。一方、地震時の大滑り域の周辺では、活発な小繰り返し地震の活動が見られ、プレート境界面上で進行する余効滑りによる影響と考えられる（東北大学[課題番号：1219]）。

さらに非地震性滑りに着目して、プレート境界を東北地方太平洋沖地震時の大滑り域（図6で赤線）、その隣接領域あるいは最大余震の隣接領域（図6で青色）、さらに地震時滑り域から見て遠方（図6で緑色）、に分けてみると、それぞれ特徴的な滑りの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、いくつかの領域では2008年ころから滑りの加速が見られた(図6中破線楕円)(東北大学[課題研究:1220])。

東北地方太平洋沖地震の最大前震である2011年3月9日に発生した三陸沖の地震(Mw7.2)の地震時滑りとそれに引き続く余効滑り分布を、陸域GPSデータおよび海底水圧計データにもとづいて推定した。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。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およそMw 6.8と推定された。前震の地震時とその余効滑りの分布は相補的であり、更にその後に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(図7)(東北大学[課題研究:1220])。

2011年の最大前震や1989年や1992年の三陸沖地震の余効変動を比較するために、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。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、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8)。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摩擦パラメータ(a-b)\*σ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(東北大学[課題研究:1220])。

2003年十勝沖地震発生後や2011年東北地方太平洋沖地震前後の地球化学データ(大気中ラドン濃度等)の変動を抽出するために、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た。その結果、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(東北大学[課題研究:1220])。

大地震に至る発生プロセスを理解するために、過去約10年間に日本列島内で発生したマグニチュード約5.0以上の本震に対して、その地震の発生前後の連続波形記録を収集した。収集した連続波形記録を用いて、2007年3月25日に発生した能登半島地震(M6.9)の発生直前に見られた前震活動について調べた。気象庁カタログによると、本震発生の約12分前に1個の前震活動(M2.2)が報告されている。この地震波形をテンプレートイベントに用いて、連続波形データに対して波形相関処理を施した。その結果、本震発生直前の12分間に4個のイベントが検出された。これらの震源を再決定したところ、本震の初期破壊開始点の極近傍(数百m以内)で発生していた事が明らかとなった(東京大学地震研究所[課題番号:1442])。

陸域の連続GPSデータを解析することで、東北地方太平洋沖地震の余効滑り領域における摩擦特性を推定した。GPSデータに時間依存インバージョン法を適用することによって、プレート境界面上における地震後約7ヶ月間の積算余効滑り及び滑り速度の時空間変化を1日毎に推定した。地震直後の余効滑り速度は最大で100 m/yrを超えており、これは東北地方太平洋沖地震により、

余効滑り領域に極めて大きな応力変化があったことを意味する。これに引き続いて、10 m/yrを超える滑り速度が地震後約15日間続いた。摩擦パラメータ $(a-b)*\sigma$ が時間的に一定な速度強化の定常摩擦に従って余効滑りが進行する場合、剪断応力変化と滑り速度の対数は比例関係を示す。これまで、いくつかの大地震の余効滑りに対して、剪断応力変化と滑り速度の対数が線形関係を示すことが確認されてきたが、東北地方太平洋沖地震の余効滑りでは、これらが非線形の関係を示した(図9)。この結果は、 $(a-b)*\sigma$ が滑り速度に依存して変化することを示す。即ち、 $(a-b)*\sigma$ を滑り速度の関数として推定すると、滑り速度が大きくなるにつれて $(a-b)*\sigma$ が小さくなり(図9b)、摩擦滑りの安定性が抑制されることが分かった。推定された滑り速度に依存する $(a-b)*\sigma$ を用いて、速度強化の定常摩擦に従う1自由度モデルを用いた余効滑りのシミュレーションを行ったところ、インバージョンで推定された余効滑りの時間変化と、剪断応力変化と滑り速度の関係が良く再現された(図9c-f)。数値シミュレーション研究により、速度強化領域における正の $(a-b)*\sigma$ の値が小さくなるほど、動的破壊が速度弱化領域から速度強化領域に伝播しやすくなり、その結果、破壊が速度強化領域を乗り越えて別の速度弱化領域に伝播する可能性が高まることが分かっている。従って、速度強化領域における $(a-b)*\sigma$ の滑り速度依存性は、地震時滑り域の空間的な大きさを決める一つの要因と考えられる(東京大学地震研究所[課題番号:1441])。

陸域のGPSデータに対して海域の地殻変動観測データを加えることで、東北地方太平洋沖地震の余効滑り分布を推定した。解析対象とした期間は、2011年4月23日から12月10日までの約8ヶ月である。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ーソグナル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、プレート境界面上の滑りの時空間発展を求めた。推定された余効滑りの分布から、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(20km以浅)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領域)の付近では、余効滑りがほとんど起きていないことが分かった(東北大学[課題研究:1220])。

超巨大地震の地震発生サイクルシミュレーション研究にも進展が見られた。これまで、東北地方太平洋沖地震の破壊領域のみを考慮して、地震発生サイクルシミュレーションを行ってきた。しかしながら、釜石沖より北部の東北沖には1968年十勝沖地震(M8.3)の震源域が存在し、この北部地域を含む連動破壊の可能性を考える必要がある。そこで、まず、釜石沖以北の1968十勝沖地震震源域についても、南部の領域と同様に滑り速度・状態依存摩擦構成則に従う階層アスペリティモデルを仮定して、地震発生サイクルの再現を行なった。その後、釜石沖の条件付き安定滑り摩擦特性(特徴的滑り量L)を変えながら、北部(十勝沖地震の震源域)と南部(東北地方太平洋沖地震の震源域)を併せた領域についてのサイクル計算を行なった。その結果、Lが小さい場合には2つの領域がほぼ同時に滑る連動破壊が生じ、一方、Lが大きい場合には破壊に時間差が生じることが分かった。シミュレーションは予備的なもので1896年明治三陸津波地震がモデル化されていないという問題は残るものの、釜石沖の摩擦特性の解明が北部域と南部域の連動・非連動破壊の鍵を握ると考えられる(東北大学[課題番号:1219])。

東北地方太平洋沖地震後の余効変動に伴う東北日本弧・内陸部におけるひずみ場の時空間変化を詳細に捉えた。その結果、大局的には余効滑りに伴って東西伸長が卓越するひずみ場が得られたが、面積ひずみで見ると収縮を示す領域が奥羽脊梁山脈に沿って連続的に分布し、周囲と比較して特徴的な結果となった。これは、この領域における東西伸長が小さく、その結果南北収縮が相対的に卓越するために面積ひずみで見ると収縮域に対応するものである。単純な余効滑りモデルで検証を行ったところ、この特徴的な収縮域は余効滑りだけでは説明ができないことが分かった(東北大学[課題番号：1219])。

東北地方太平洋沖地震前のひずみ集中および本震に伴う応力擾乱によって生じた、脊梁山地ひずみ集中帯および前弧域ひずみ集中帯のひずみ異常のパターンを、有限要素法によって再現し、地殻及び上部マントルのレオロジー構造を推定した。地震発生前にはひずみ集中、地震時には小さな東西伸長が観測された脊梁山地ひずみ集中帯の振る舞いは、周辺に比べてより浅部にまで低粘性を仮定したモデルにより再現できた。地震前と地震時のいずれにおいても周辺に比べて大きな変形が観測された前弧域ひずみ集中帯の振る舞いは、表層にある厚い堆積層の効果で説明可能であり、地殻及び上部マントルに低粘性を仮定する必要は必ずしもないことが明らかとなった。しかし、地震後の前弧域ひずみ集中帯の変形は、地殻・上部マントルに低粘性を仮定するか否かにより大きく異なることも明確になった。そのため、この地域の変形を、今後10年程度にわたり詳細に観測することが、前弧域ひずみ集中帯の成因を解明するために重要であると考えられる(東北大学[課題番号：1219])。

## 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

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関数の静的な変化( $\Delta CFF$ )で概ね説明できるが、それに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考えられる(図10)。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れる場合が多く、この低速度域は流体の分布域であると考えられる。たとえば、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ヶ月後に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同時に、大滑り域の周囲は低速度・低比抵抗で特徴づけられ、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 $\sigma_1$ 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

りつくられる応力が、この地域で支配的である可能性があげられる。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しれないことが示唆された（東京大学地震研究所[課題番号：1444]）。

日本列島の震源断層の位置形状についてのカタログを作成するために、主に日本海沿岸北部におけるMCSデータを収集し、東北日本内陸域の震源断層モデルを作成した（東京大学地震研究所[課題番号：1445]）。

## （２） 超巨大地震とそれに起因する現象予測のための観測研究

### ア． 超巨大地震の震源域における地殻活動のモニタリング

プレート境界での固着・滑りの状況を把握するために、GPS—音響測距結合方式による海底地殻変動観測を継続した。日本海溝沿いの海底基準点では、東北地方太平洋沖地震発生後の海底変動を捉えた。図11に水平方向の累積変動量を示す。「宮城沖1」では、西北西方向の地殻変動が観測されており、本震後の累積変動量は41cmとなる。2011年7月10日の余震（M7.3）から2012年12月7日の三陸沖の地震（M7.3）までの期間でも、西向きに22cmの地殻変動が観測されている。また、「釜石沖1」でも時系列のばらつきが大きいものの西北西方向の地殻変動が観測されている。その他、「宮城沖2」では南向きに17cm、「釜石沖2」では北西方向に6cmの地殻変動が検出されており、東北地方太平洋沖地震の震央周辺では複雑な地殻変動を示している。一方、「福島沖」及び「銚子沖」では、本震後、プレートの沈み込み方向と逆方向の東南東方向に余効変動が検出されており、時間とともに減衰している様子が見える。累計変動量は、「福島沖」で65cm、「銚子沖」で36cmである。上下方向では、「銚子沖」海底基準点を除き、沈降傾向が見られている（海上保安庁[課題番号：8006]）。

また、南海トラフの海溝軸付近における海底地殻変動モニタリングのために投入予定の海底局の機器整備を行った。設置を予定している海域は、水深が3,500m程度とこれまでの海域（水深2,000m程度）よりも深いため、深海型と呼ばれる海底局を設置することとした。さらに、熊野灘KME観測点の南東方向約50km（トラフ軸から約30km）の地点に、名古屋大学／東北大学の両仕様を兼ね備えたハイブリッド型海底局を新設した。この点は、トラフ軸から陸域までの連続的な地殻変動プロファイルを得るために重要な観測点になる（名古屋大学[課題研究：1709]）。

東北地方北部日本海溝沿いの地震活動モニタリングのために、エンベロープ波形をテンプレートとして用いる震源決定法の開発を行った。まず、連続波形のエンベロープとテンプレートのエンベロープとの相関を計算し、相関係数の時系列を求めた。次いで、複数のテンプレートに対応する時系列の中から最も相関の高いテンプレートを選び出すことで、震源が未知の地震に対応するテンプレートを抽出した。この方法を、内陸で発生した2004年新潟県中越地震の本震直後の連続波形に適用し、地震の抽出とマグニチュードの決定が可能であることを確認した。sP波については、宮城県沖で発生した地震を対象に基本的な性質を調べ、振幅の自動的な測定を行った。その結果得られた振幅分布はメカニズム解を反映していることが判明し、振幅情報をメカニズム解決定に用いることが有効と判断できた（弘前大学[課題番号：1219]）。

南海トラフより海側には、トラフ軸にほぼ平行に走向する銭洲海嶺が存在する。銭洲海嶺を含めた海域は、島弧地殻を持つフィリピン海プレートが衝突する地域であり、通常の海洋性地殻の沈み込み形態とは異なる。銭洲南側で確認されている新たな沈み込みだけではなく、上盤側に発達する断層分布や下盤側の地殻構造は、東南海地震発生域、南海地震発生域とも異なる分布を示す。これまで、プレート境界には銭洲海嶺と同様な走向を持つ地形的な高まりが前弧域下に確認されている。これらの高まりは内部にP波速度6km/sを持つ島弧地殻に近い構造列を形成していることが明らかになりつつある。上盤側では褶曲構造が一部取り込まれた様子も見つかリ、紀伊半島沖で見られる付加体構造と大きく異なる特徴を示す。下盤側では、トラフ軸に近いところに複数の断層が発達し、プレート内が強い変形を被り、プレート内部に構造線が発達する（海洋研究開発機構[課題番号：4006]）。

## イ. 超巨大地震の長期評価手法

超巨大地震のグローバル長期評価手法の確立のためには、地震カタログの整備とその性能を評価することが欠かせない。このために、グローバルな地震カタログである GCMT, ISC, ISC-GEM カタログを用いて、データベースを構築した。これらのデータベースを時間、領域、マグニチュード等で簡単に検索・解析ができるソフトウェアを整備するとともに、カタログの性能評価を実施した（東京大学地震研究所[課題番号：1446]）。

地震統計を基礎とする地震発生予測モデルの一つである **Relative Intensity (RI)** モデルを用いて、東北地方太平洋沖地震を含む 2011 年の地震発生予測結果とそれ以前の予測結果の比較を行った。地震カタログとしては、学習および評価に GCMT カタログを使用した。地震の予測は、マグニチュード 6 以上とした。2009 年および 2010 年の予測結果は、すべてのテストをパスしたが、2011 年の予測結果は、パスした評価テストとパスできなかった評価テストがあった（東京大学地震研究所[課題番号：1446]）。

東南海地震震源域におけるリアルタイムデータを用いたデータ同化研究を推進した。実データとして、GEONET ならびに DONET の観測データを（準）リアルタイムにデータベース化していくとともに、データ同化手法として粒子フィルターのプログラムを整備し、それを適用するための地震発生サイクルシミュレーション結果を蓄積する必要がある。そこで GEONET ならびに DONET の観測データを蓄積するデータベースを構築するとともに、定期的かつ自動的にデータを取り込むシステムを構築した。また、粒子フィルターのプログラムを作成し、GEONET データと地震発生サイクルシミュレーション結果の比較を行った。その結果、1996 年以降の西南日本の上下変化に概ね整合するシミュレーション結果が得られるとともに、豊後水道 SSE のようにシミュレーションに含まれていない現象が、データとシミュレーションのずれとして現れることが確認できた（図 12）（海洋研究開発機構[課題番号：4007]）。

## ウ. 超巨大地震から発生する津波の予測

東北地方太平洋沖地震により発生した津波による被害は甚大であったことから、超巨大地震に伴う津波の精度良い予測手法の開発は急務である。

北海道太平洋沿岸は、津波堆積物調査結果より、最近のM8クラスの巨大地震による津波よりもはるかに大きな津波が太平洋沿岸を襲っていたことも明らかになっている。このような大津波による被害を最小限に抑えるためには、リアルタイム津波浸水予測の開発が急務である。津波浸水域を精度よく予想するためには、10m以下の細かい格子間隔で津波遡上数値計算を実施する必要がある。地震が発生してから津波数値計算を実施しては時間がかかるため、太平洋沿岸の津波を事前に予測することができない。そこで、あらかじめ津波遡上数値計算を実施しておき、それをデータベース化することで、リアルタイムで津波浸水域を予測する手法を開発した。巨大地震の発生後、推定された震源とマグニチュードから地震のスケーリング則を用いて断層モデルを決定する。その断層モデルを用いて線形長波近似式を用いた津波数値計算を実施する。北海道太平洋沿岸に対する上記津波数値計算は、通常のパソコンでも1-3分程度で完了するため、十分に津波予測に利用することができる。この結果を利用してデータベースから最適の津波浸水予測結果を抽出することでリアルタイム津波浸水予測を実現する。上記手法を用いて、釧路市での津波浸水域をどの程度予測可能であるか実験した。結果は良好に予測できることが分かった(図13)。この手法は、リアルタイム津波浸水予測が可能であることを示す画期的な成果である(北海道大学[課題番号1006])。

震源断層即時推定時の初期情報(発震機構解)をRTK-GPSデータのみで得ることを目的とし、RAPiDアルゴリズムで得られた変位データを、GPSによる永久変位から地震メカニズムおよび規模を即時推定する手法(fastCMT)に入力する(以下、RAPiD/fastCMT)ことを試みた。対象とした地震は、東北地方太平洋沖地震後に発生した茨城県沖地震(Mw7.8)および、東北地方太平洋沖地震そのものである。fastCMTは任意のグリッドにおける最適なCMT解を推定するアルゴリズムである。茨城県沖地震(Mw7.8)による地震時変動データに適用した場合、地震後166秒後の段階(RAPiDアルゴリズムで変位量推定が完了した段階)でMw=8.0という地震規模と低角逆断層型の発震機構解を推定することができた。一方、東北地方太平洋沖地震時のデータにRAPiD/fastCMTアルゴリズムを適用した場合、地震発生後275秒でCMT解は推定可能であるが、地震規模がMw=9.5と実際より大幅に過大評価されてしまった。しかし、両地震とも、発震機構解の節面の方向についての推定結果はおおむね良好で、有限断層推定の初期情報として利用可能であることが示された(東北大学[課題番号:1221])。

さらに、RAPiDにより得られる広域の地震時変位データから推定された震源モデルを、津波波源の初期モデルとして採用し、沖合津波観測データを用いてこれを逐次的に改善する手法の開発を進めた。具体的には、時間経過とともに沖合観測点で得られる観測津波波形と、初期モデルから期待される計算津波波形との差を最も小さくするように、波形逆解析を用いて初期モデルを修正し、新たなモデルをもとに津波波形を計算して沿岸の津波予測を逐次更新する、というものである。このうち、津波解析に関連する部分はtFISHアルゴリズムを活用した。統合解析アルゴリズム(tFISH/RAPiD)の性能を調べるため、東北地方太平洋沖地震を対象として、仮想的な観測

津波波形を用いた津波予測実験を行った。その結果、tFISH/RAPiDを適用することで、沖合津波計と陸上GPSデータの情報の双方を有効に活用した津波即時予測が可能になることが示された(図14) (東北大学[課題番号：1221])。

正確な地震・津波情報を迅速に提供するため、北海道から房総沖に至る日本海溝周辺において地震・津波観測網を整備することが欠かせない。海洋調査を実施し、観測点配置とケーブルルートを決めた。さらに地下構造調査を実施し、ケーブルルートに沿った浅部地下構造を求めた(防災科学技術研究所[課題番号：3012])。

### (3) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明と予測のための新技術の開発

#### ア. 超巨大地震のための海底地殻変動観測技術

東北地方太平洋沖地震の発生時に大きな滑りを伴った日本海溝軸近くの海域において、海底圧力連続観測を開始した。観測地点の水深は、従来海底圧力観測を行ってきた海域に比べてはるかに深い(約7,000m)、耐圧容器・水中ケーブルは耐圧9,000m相当のもの、圧力センサーはフルスケール7,000mのもので観測システムを作成し、海溝軸付近に設置した。5～10月の期間に得られた水圧変化の時系列を図15に示す。短期間の間に100hPaという大きな圧力減少が観測されたが、これは圧力センサーの過渡的な特性である可能性が高い。今後、複数のセンサーによる同時観測や、センサーの加圧テストなどから、超深海型のセンサー特性の把握を進める必要がある。海底間音響測距装置に関しては、ガラス球を9000m耐圧に変更、受信感度と返信信号の感度向上、GPS音響と同じ方法である一定期間のデータを収録する方法に変更等の改良を行った。開発した装置は、2013年2月の航海で水深6000mの緩やかな斜面に基線長3kmになるように2台を対で設置した。航海終了時に2台とも回収し、今後測距結果を確認し、問題点があれば出力・感度調整などに反映させる予定である(東北大学[課題番号：1222])。

#### イ. 海底地形・堆積物調査技術

津波堆積物の検出のために、下北半島、仙台平野、北茨城、房総半島(九十九里浜及び夷隅川河口)の沿岸低地において、ボーリングやジオスライサーによる地層のコア採取を行い、さらに、仙台湾で海底表層の地層のコア採取を実施した。また、地殻変動の解析を目的とした航空レーザー計測による地形データ取得を房総半島南部沿岸で実施した。和歌山県串本町では津波石の分布の正確な把握のため、地上レーザー計測を実施した(産業技術研究所[課題番号：5006])。

海底活断層の分布や構造を明らかにするために、日本海溝周辺(福島沖・茨城沖の大陸棚から陸棚海溝斜面にかけて)のMCSおよび海底地形データを収集し、これらのデータに基づいて、海底活断層の分布や構造について予察的な検討を行った(東京大学地震研究所[課題番号：1447])。

### これまでの課題と今後の展望

東北地方太平洋沖地震を受けて、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」が見直され、「超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究」が加わった。その内容は次の3項目を推進する

こととされ、(1) 超巨大地震の発生機構とそれに起因する現象を解明する観測研究、(2) 超巨大地震やそれに起因する現象を予測するための観測研究、(3) これらの解明と予測のための観測研究に必要な新技術の開発を行う研究、である。

超巨大地震の発生機構とそれに起因する現象を解明するためには、まず「その発生サイクルの解明」が必要となり、低頻度の超巨大地震のサイクルを理解するためには地質学的研究が重要となる。しかし、津波堆積物調査結果から実際の津波浸水域を得るにはまだまだ解決すべき問題が多く存在することが明らかになった。さらに各地点でのイベント対比にも大きな問題が残る。これらを解決するための新技術の開発に期待がかかる。

また、「超巨大地震の発生とその前後の過程の解明」を進める必要がある。東北地方太平洋沖地震前後の地震活動や地殻変動のデータの解析が進み、プレート境界での応力蓄積・解放の過程に関する理解が進んできた。同時に、今までの理解が不十分であったことも明らかになってきた。例えば、東北地方太平洋沖地震の滑り量分布からは、海溝付近と深部に滑り域があることが確認され、東北地方太平洋沖地震後の相似地震の分布やプレート境界で発生した余震分布は滑り量分布と相補的であり、本震の滑りによって応力がほぼ解放されたことが明らかになった。一方、海溝付近の超低周波地震の活動や2011年03月09日の最大前震とその後のゆっくり滑りの存在や、滑り域内に分布する相似地震の活動は、東北地方太平洋沖地震の滑り域および周辺におけるプレート境界面上の滑りの複雑性、且つ、多様性を示唆する。東北地方太平洋沖地震の様な超巨大地震の発生サイクルの理解およびモデル構築の為には、東北地方太平洋沖地震の震源域内に加え、近接する釜石沖や、より北方・南方などの周辺も含めたより広域的な視点からの一層の理解が必要である。上盤側プレートの挙動でも、本震時および直後のひずみ場が不均質であったことが明らかになり、長期的な変動場を高精度に捉え、東北地方太平洋沖地震前のひずみ速度分布との比較や地震波速度構造などとの比較、さらにそれらを説明するためのレオロジー構造の構築によって東北地方太平洋沖地震前後の挙動を理解することも重要である。

次に、超巨大地震に誘発された内陸地震や火山活動等の解明が課題となり、東北地方太平洋沖地震により実際に誘発された多くの内陸地震についての解析が進んできた。誘発のメカニズムにはやはり流体の関与が示唆されており、流体関与のモデル化が今後の課題であろう。

超巨大地震やそれに起因する現象を予測するための研究としては、まず「超巨大地震の震源域における地殻活動のモニタリング」に関する研究が重要となる。そのためには海底地殻変動の観測が当然重要となる。東北地方太平洋沖地震では海溝近傍で大きな滑りが発生したことを考慮すると、今後さらに深海域での高精度な海底地殻変動データの取得を目指した技術開発が必要となる。また、「超巨大地震の長期評価手法の開発」も重要課題あり、地震発生サイクルシミュレーションを組み込んだ長期評価を実現するためには、GEONETやDONETの観測データを同化する研究を推進する必要がある。さらに、「超巨大地震から発生する津波の予測」は将来の超巨大津波発生時の被害を軽減するためにも、緊急の研究課題である。リアルタイム津波浸水予測技術の開発等、様々な手法の開発や観測網の設置が進んできているが、さらなる進歩がおおいに期待される。

最後に新技術の開発では、すでに述べたように、「海底地殻変動観測手法のさらなる開発」と「実際の津波とその波源を理解するための津波堆積調査手法の高度化」が期待される。

## 成果リスト

- 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
- Azuma, R., Y. Murai, K. Katsumata, Y. Nishimura, T. Yamada, K. Mochizuki and M. Shinohara, Was the 1952 Tokachi-oki earthquake (Mw=8.1) a typical underthrust earthquake?: Plate interface reflectivity measurement by an air gun - ocean bottom seismometer experiment in the Kuril Trench, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 13, Q08015, 10.1029/2012GC004135, 2012.
- Chiba, K., Y. Iio, and Y. Fukahata, Detailed stress fields in the focal region of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake ?Implication for the distribution of moment release?, *Earth Planets Space*, 64, 1157-1165, 2012.
- 藤原治・佐藤善輝・小野映介・海津正倫, 2013, 陸上掘削試料による津波堆積物の解析 浜名湖東岸六間川低地にみられる3400年前の津波堆積物を例にして, *地学雑誌*, 122, 印刷中
- 福田秀樹, 2013, 稠密GPS データによる山形盆地断層帯周辺および東北地方中央部における2011年東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動場, 山形大学修士論文.
- Gusman, R. A., M. Fukuoka, Y. Tanioka, S. Sakai, Effect of the largest foreshock (Mw 7.3) on triggering the 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0), *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1002/grl.50153, in press
- Gusman, A. R., Y. Tanioka, S. Sakai, and H. Tsushima, Source model of the great 2011 Tohoku earthquake estimated from tsunami waveforms and crustal deformation data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 341?344, 234?242, doi:10.1016/j.epsl.2012.06.006, 2012.
- Hasegawa, A, K. Yoshida, Y. Asano, T. Okada, T. Iinuma, Y. Ito, 2012, Change in stress field after the 2011 great Tohoku-oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 355-356, 231-243.
- 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.
- 飯尾能久・松澤暢, 東北地方太平洋沖地震の発生過程—なぜM9が発生したのか?—, *地質学雑誌*, 118, 5, 248-277, 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.
- Ioki, K., Source process of great earthquakes along the Kurile trench estimated from tsunami waveforms and tsunami deposit data, PhD dissertation, Graduate School of Science Hokkaido University, 2013.
- Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, J. Ashi, 2012, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, in press.
- Johnson, K. M., J. Fukuda, and P. Segall, 2012, Challenging the rate-state asperity model: Afterslip following the 2011 M9 Tohoku-oki, Japan, earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20302, doi:10.1029/2012GL052901.
- 海上保安庁, 2012, 東北地方太平洋沖地震前までの海底地殻変動観測結果(再解析), 地震予知連絡会報, 88, 143-149.
- 海上保安庁, 2012, 東北地方太平洋沖地震後海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 88, 150-154.
- 海上保安庁, 2012, 東北地方太平洋沖地震後の海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 89, 印刷中.
- Kakinami, Y., M. Kamogawa, Y. Tanioka, S. Watanabe, A.R. Gusman, J.-Y. Liu, Y. Watanabe, and T. Mogi, Tsunamigenic ionospheric hole, *Geophys. Res. Lett.*, 39, doi: 10.1029/2011GL050159, 2012
- 金沢敏彦, 2012, 日本海溝海底地震津波観測網について - 観測網の概要とその背景 -, 地震本部ニュース, 2, 6-7.
- 金沢敏彦, 2012, 日本海溝海底地震津波観測網について 2 - 観測網のシステム概要と期待される効果 -, 地震本部ニュース, 3, 6-7.
- Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa and N. Hirata 2012, Propagation of Slow Slip Leading Up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 335, 705-708, doi:10.1126/science.1215141.
- Kato, A. and T. Igarashi, 2012, Regional extent of the large coseismic slip zone of the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake delineated by on-fault aftershocks, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 39, L15301, doi:10.1029/2012GL052220.
- Mitsui, Y. and Y. Iio, How did the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake start and grow? The role of a conditionally stable area, *Earth Planets Space*, 63, 755-759, 2011.
- Mitsui, Y., Y. Iio, and Y. Fukahata, A scenario for the generation process of the 2011 Tohoku earthquake based on dynamic rupture simulation: role of stress concentration and thermal fluid, *Earth Planets Space*, 64, 1177-1187, 2012.
- Nakahigashi, K., M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Yamada, R. Hino, T. Sato, K. Uehira, Y. Ito, Y. Murai, and T. Kanazawa, P-wave velocity structure in the southernmost source region of the 2011 Tohoku earthquakes, off the Boso Peninsula deduced by an ocean bottom seismographic survey, *Earth Planets*

- Space, 64, 1149-1156, 2012.
- 中村有吾, 西村裕一, 伊尾木圭衣, プルナスラスティアプトラ, アディティアグスマン「北海道における2011年東北地方太平洋沖地震津波の現地調査」北海道地区自然災害科学資料センター報告, 26, 3 - 45, 2013.
- Nakamura, Y., Nishimura, Y., Putra, P.S., Local variation of inundation, sedimentary characteristics, and mineral assemblages of the 2011 Tohoku-oki tsunami on the Misawa coast, Aomori, Japan, *Sedimentary Geology*. 282, 216-227, 2012.
- Nanjo, K. Z., H. Tsuruoka, S. Yokoi, Y. Ogata, G. Falcone, N. Hirata, Y. Ishigaki, T. H. Jordan, K. Kasahara, K. Obara, D. Schorlemmer, K. Shiomi, and J. Zhuang, Predictability study on the aftershock sequence following the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku, Japan, earthquake: First results, *Geophys. J. Int.*, 191, 2, 653-658, 2012.
- Nanjo, K. Z., S. Sakai, A. Kato, H. Tsuruoka, and N. Hirata, Time-dependent earthquake probability calculations for southern Kanto after the 2011 M9.0 Tohoku earthquake, *Geophys. J. Int.*, in press.
- Obana, K., G. Fujie, T. Takahashi, Y. Yamamoto, Y. Nakamura, S. Kodaira, N. Takahashi, Y. Kaneda, and M. Shinohara, 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, 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.
- Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Iinuma, K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono and N. Umino, Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0), *J. Geophys. Res.*, 117, B02311, doi:10.1029/2011JB008750, 2012.
- Ohzono, M., Y. Yabe, T. Iinuma, Y. Ohta, and S. Miura, 2012, Strain anomalies induced by the 2011 Tohoku Earthquake (Mw 9.0) as observed by a dense GPS network in northeastern Japan, *Earth, Planets and Space*, 64(12), 1231-1238, doi:10.5047/eps.2012.05.015.
- 大久保修平, 2012, ナノで見た日本列島の重力変化ー東北地方太平洋沖地震の影響, *地震ジャーナル*, 54, 24-25
- Sawai, Y., Y. Namegaya, Y. Okamura, K. Satake and M. Shishikura, 2012, Challenges of anticipating the 2011 Tohoku earthquake and tsunami using coastal geology, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L21309, doi:10.1029/2012GL053692.
- Sawai, Y., M. Shishikura, Y. Namegaya, Y. Fujii, Y. Miyashita, K. Kagohara, O. Fujiwara and K. Tanigawa, 2012, Diatom assemblages in tsunami deposits on a paddy field and paved roads from Ibaraki and Chiba prefectures, Japan, generated with the 2011 Tohoku tsunami, *Diatom*, 28, 1-8.

- Shinohara, M., Y. Machida, T. Yamada, K. Nakahigashi, T. Shinbo, K. Mochizuki, Y. Murai, R. Hino, Y. Ito, T. Sato, H. Shiobara, K. Uehira, H. Yakiwara, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, K. Hirata, H. Tsushima, and T. Iwasaki, Precise aftershock distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake revealed by ocean bottom seismometer network, *Earth Planets Space*, 64, 1137-1148, 2012.
- 宍倉正展・藤原 治・澤井祐紀・行谷佑一・谷川晃一朗, 2012, 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波堆積物の仙台・石巻平野における分布限界, 活断層・古地震研究報告, 12, 45-61.
- Suzuki, K., R. Hino, Y. Ito, Y. Yamamoto, S. Suzuki, H. Fujimoto, M. Shinohara, M. Abe, Y. Kawaharada, 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*, 64, 1125-1135, 2012.
- 谷岡勇市郎, Aditya R. Gusman, 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波解析結果から再検討する巨大津波の発生様式, *地震*, 64, 265-270, 2012
- 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).
- Tsushima, H., R. Hino, Y. Tanioka, F. Imamura, and H. Fujimoto, Tsunami waveform inversion incorporating permanent seafloor deformation and its application to tsunami forecasting, *J. Geophys. Res.*, 117, B03311, doi:10.1029/2011JB008877, 2012.
- 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.