

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

東北地方太平洋沖地震震源域周辺における多項目・高精度モニタリングによる超巨大地震発生過程の解明

(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：

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

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

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

ア．アスペリティの実体

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

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

東北地方太平洋沖地震は、多項目モニタリングの対象としてきた宮城県沖を震源とした地震であったため、こうした観測データにより詳細な震源像の解明が可能であると期待される。しかし、地震に伴う滑り量が極めて大きく、それを反映して変動量が非常に大きいことから、モデル化に伴う系統誤差の影響が大きくなることによって、震源モデルが十分な精度で推定できていない可能性がある。今回の地震の震源モデルは、超巨大地震発生機構を理解するために最も基本的な知見であり、本研究課題では、地震時に得られた貴重なデータを活用して確度の高い震源モデルを構築することが第一の目的である。またモニタリングデータは、超巨大地震発生に至るまでの過程を捉えたものである。残念ながら、こうしたデータから超巨大地震発生を予測することはできなかったが、事後ではあっても丹念に解析することにより、超巨大地震の発生に先行した特異な現象がなかったかを検証することは、今後の巨大地震発生予測のための戦略を再検討するために重要な知見を提供する。そこで、本研究の第二の目的は、モニタリングデータから東北地方太平洋沖地震発生に至る過程を明らかにすることである。東北地方太平洋沖地震の発生後、顕著な余効変動が観測されている。本学が進めている海底地殻変動観測の結果によれば、日本海溝近傍で数 m におよぶ余効滑りが継続している可能性が示されている。これは陸上 GPS 観測のデータからは検知することが極めて困難である。一方で、余効滑りが広範囲に発生していることも確かであって、海陸にまたがる観測網の構築なくして余効変動の実情を明ら

かにすることはできない。そこで、モニタリング観測の対象を宮城県沖周辺から可能な限り拡大して、余効変動の推移を明らかにすることが第三の目的である。余効滑りの推移やプレート間固着の回復状況は、次の大地震の発生過程とも密接に関連することから、こうした観測は東北地方太平洋沖地震の発生過程の解明だけでなく、近い将来における大地震発生ポテンシャルの評価にも重要な情報を提供する。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

1. 東北地方太平洋沖地震の震源像の解明

東北地方太平洋沖地震の震源像を明らかにすることが、超巨大地震の発生過程を解明する上での出発点である。宮城県沖で始まった破壊がなぜ超巨大地震に成長したのか、なぜ破壊が日本海溝全域にまで拡大しなかったのか、など基本的な問題が未だに未解明である。そこで、地震時に得られた地震・測地学的データ（特に、震源域及びその周辺で取得されたもの）の再解析を通して、この地震の震源モデルの再検討を行う（平成24年度）。

2. 東北地方太平洋沖地震発生に至る過程の詳細解明

・東北地方太平洋沖地震が発生するまでの相似地震・海陸測地データの再解析を行い、サブテーマ1で明らかとなった震源モデルに従うような超巨大地震の発生につながると解釈できるようなプレート間固着・滑り過程があったか検討する（平成24,25年度）

・東北地方太平洋沖地震の発生直前の数ヶ月間に海陸の観測データで捉えられた微小地震活動・地殻変動に着目し、超巨大地震が発生するに至った過程を詳細に明らかにする（平成24年度）。

・過去に宮城県沖で発生したプレート境界型地震に伴う非地震性滑り（主として余効滑り）と、東北地方太平洋沖地震の前震とそれに伴う余効滑りの特徴を比較することにより、超巨大地震発生に至る場合とそうでない場合とで、非地震性滑りの活動に相違が見られるかを検討する（平成25年度）。

・東北地方太平洋沖地震発生前後での大気中ラドン濃度の時間変動に関するデータの収集をすすめて再解析を行うことにより、地震発生に伴う地球科学的異常の検出を試みるとともに、異常が検知できた場合にはその特徴を詳細に明らかにし、その原因となる素過程解明に資する（平成24年度）。

3. 余効滑りの時空間分布とそれに起因する地殻活動状況の総合モニタリング

・陸上観測に基づく小繰り返し地震解析によりプレート間滑り速度の時空間変化を推定する。それと同時に海陸において測地観測（GPS、GPS/A、海底水圧観測など）を行い、それに基づいてプレート間滑り速度の時空間分布を推定する（平成24,25年度）。これには、小繰り返し地震のスケールアップの高度化や、GPSデータを用いた逆解析手法の再検討などを含む。

・地震時滑りが大きかった宮城県沖から余効滑りが進行していると考えられる岩手県沖において海底地震観測を実施し、プレート境界に沿った地震活動度の時空間変化を明らかにする。地震時滑りが大きかった領域で低下したプレート境界近傍の地震活動の回復過程、その周囲の余効滑り域との境界域における地震活動の変化などから、断層の強度回復過程の解明を目指す（平成24,25年度）。

・海底に露出した断層の近傍において海底ゆう水量観測を実施し、海底地震・地殻変動観測により検知されるゆっくり滑りイベントの発生と、ゆう水イベントの対応を明らかにすることにより、浅部プレート境界におけるゆっくり滑りイベントへの流体の関与の実態を明らかにする（平成24,25年度）。

・深層地下水変動及び大気中ラドン濃度の観測を継続時、今後発生し得る大地震に先行するあるいは発生に伴う異常現象の検出を試みる。異常が認識された場合、東北地方太平洋沖地震の発生時の変動との共通点・相違点の検討を行い、地球化学的異常の発生過程の理解を図る（平成24,25年度）。そのために、東日本に存在する放射線管理施設のデータを用いてモニタリングするためのネットワークを構築する（平成24年度）。

(7) 計画期間中（平成21年度～25年度）の成果の概要：

1) 2011年東北地方太平洋沖地震の震源像の解明

・地震時の観測データの再解析は予定通り進まなかったため、東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）

の震源像の詳細な検討を進めることはできなかった。しかし、平成 24 年度までに海陸観測で得られたデータから推定した震源モデルを震源域の地下構造と比較することにより、東北地方太平洋沖の地震時滑りの分布に対する考察を進めた（1205 参照）。

2) 東北沖地震発生に至る過程の詳細説明

・GPS 観測から得られる変位速度場の空間勾配に基づいて、東北日本におけるプレート間カップリングの時空間変化の推定を試みた。変位速度の空間勾配は、プレート境界における固着状態に強く依存することから、測地観測からプレート間固着状態の時空間変化をインバージョン解析に拠らずに推定する有効な指標となる。2005 年の宮城県沖で発生した地震（M7.2）、2003 年十勝沖地震（M8.0）の余効滑りの発生時のほか、福島県沖から茨城県沖にかけての領域で 2008 年末ころから固着の弱化もしくは準静的滑りに起因すると考えられる勾配の時間変化が認められた。

・約 30 年間にわたる小繰り返し地震データを用いてプレート境界の非地震性滑りの時空間分布を推定した。プレート境界を東北沖地震時に大きく滑った領域、その隣接領域あるいは最大余震の隣接領域、更に地震時滑り域から見て遠方に分けるとそれぞれ特徴的な滑り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の加速が見られた。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、地震時滑り域の近いいくつかの領域では 2008 年頃から滑りの加速が見られた。

・東北沖地震発生前から宮城県沖で行っていた自己浮上式海底圧力計（OBP）の繰り返し設置による観測から、東北沖地震の震源域内で 2008 年と 2011 年にスロースリップが発生していたことが明らかとなった。2 回のイベントの発生位置はほぼ同じであり、その隣接域でプレート境界型地震の活発化を伴った点も類似している。ただし、2011 年のイベントは 2008 年のイベントより継続時間が長く、東北沖地震発生約 1 か月前から本震発生直前まで継続していた可能性が高い。

・東北沖地震が発生する 2 日前（3 月 9 日）に発生した前震とその余震および 3 月 11 日の本震の震源を海底地震計のデータを加えて再決定したところ、本震に至るまでの地震活動の中心は、本震の破壊の開始点より海溝側に広がっていることが確認された。この領域は通常から地震活動が活発な地域であり、2005 年に発生した宮城県沖の地震の発生直後や 2008 年に、M6 程度の地震を含む群発的な地震活動が見られている。今回の前震活動の震央分布を、海底地震観測のデータを用いて決定された 2002～2009 年の震央分布と比較すると、良い一致を示しており、定常的な地震活動と前震活動の分布パターン間に明瞭な差異を見いだすことはできない。

・3 月 9 日の前震の地震時滑りとそれに引き続く余効滑り分布を陸上 GPS データおよび海底水圧計データに基づいて推定した。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 Mw6.8 となった。前震の地震時とその余効滑りの分布は相補的であり、更にその後発生した東北沖地震の地震時滑り量が周辺と比較して少ない領域に、前震およびその余効変動の滑り分布は位置する。

・前震の余効滑りは Ide et al. (2007) によるスロースリップイベントのスケーリング則から外れ、モーメント解放量に対して継続時間が短い。同様の傾向は、1989 年と 1992 年の三陸沖で発生した M7 級の地震後の余効滑りでも認められる。発生開始から短時間のうちに大きなモーメントを解放する性質は、定性的には滑り速度・状態依存摩擦構成則における $(a-b)$ 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す。

・本震発生直前の OBP の連続記録を詳細に解析することにより、前震やその余効滑り以外の本震に先行した地殻変動イベントの探索を行った。その結果、前震発生後の 2 日間の間で、ノイズレベルを上回るような有意な変動を認めることはできなかった。OBP 観測の検知能力から、本震の破壊開始点の周辺については Mw6.2 以上、海溝近傍では Mw6.0 相当以上のモーメント解放を伴うプレート境界断層上での滑りの加速はなかったと判断される。

・大気中ラドン濃度変動による地殻変動活動モニタリングを目的として、全国放射線管理施設のモニタリングネットワークの構築を行ってきた。これまでに取得した RI 施設（和歌山県立医科大、東北

薬科大学、札幌医科大学、福島県立医科大、獨協医科大など)の大気中ラドン濃度変動の解析を行い、2003年十勝沖地震発生後の変動の他、2011年東北地方太平洋沖地震や2011年7月5日に発生した和歌山県北部地震の発生に先行して大気中ラドン濃度に異常変動があったことを検出した。

3) 余効滑りの時空間分布とそれに起因する地殻活動の総合モニタリング

・東北沖地震以前から継続してGPS/A方式海底地殻変動観測を継続している観測点GJT3(宮城県沖・海溝軸からおおよそ50km)において、キャンペーン観測を継続して実施した。2011年4月、8月、11月および2012年7月の観測で得られたデータの解析の結果、地震後約1年3か月間に西北西方向に約0.5mの水平変位があったことがわかった。2013年の測位結果は、2012年7月までの変位時系列の延長にのらないが、これは2012年12月7日に観測点近傍で発生したMw7.2のスラブ内地震による地震時変位の影響が含まれている可能性がある。

・平成24年度に日本海溝沿いの20観測点にGPS/A観測点を新設し、余効変動の空間変化を把握するための観測に着手した。これまでに3回の観測が完了しているが、信頼できる変位速度ベクトルを推定するためには観測の継続が必要である。

・2011年10月までのOBPの連続記録から余効変動による海底鉛直変動の時系列が得られた。宮城県沖のいずれの観測点においても、明瞭な沈降が観測されているが、その変動レートは時間とともに減少する様子が認められる。大局的な時間変化のパターンは、宮城県沿岸部でのGNSS観測点で観測される余効変動時系列と相似であって、時定数20日の対数関数でよく近似できる。余効変動による沈降は、海上保安庁のGPS/A観測からも示されており、OBPとGPS/Aの観測結果を総合すると、海溝軸から海岸線に向かって、また観測領域南側に向かって沈降量が大きくなる傾向が見られる。

・OBPを用いた連続観測は2011年以降も継続しているが、センサー固有の長期ドリフトと余効変動成分の分離が困難であるため、上記の余効変動による海底鉛直変動の推移の把握は、現時点ではできていない。地震直前に観測されたようなスロースリップに起因すると解釈できるような変動も観測されていない。

・海陸の地殻変動観測データに基づき、2011年東北地方太平洋沖地震の余効滑り分布を推定した。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か月である。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ホーツク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、得られた変位時系列に時間依存逆解析手法(Yagi & Kikuchi, 2003)を適用することで、プレート境界面上の滑りの時空間発展を求めた。OBPデータから得られる海底の上下変位データについては、前項の近似曲線によって圧力計回収後のデータを補完し重みを下げて使用することで、余効滑りの時空間発展にある程度の拘束をかけられるようにした。粘性緩和については、球殻二層構造を仮定した場合と、沈み込むスラブの形状や大陸・海洋性それぞれのマンツルの粘性の違い等を考慮した場合について、海底地殻変動データも用いて推定された地震時滑り分布(Iinuma, et al., 2012)を初期条件として与えて、地表での変位を計算した。

・推定される余効滑りの分布は、粘性緩和の計算に非常に強く依存することが示された。その一方で、粘性構造の仮定に依らず、茨城・福島両県沖のプレート境界のごく浅部(20km以浅)、すなわち地震時には50mを超えるような大きな滑りが生じなかった領域においては、大きな余効滑りが推定されること、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)の付近ではほとんど滑っていないことなどが分かった。

・余効滑り分布は、プレート境界面上発生する小繰り返し地震の、本震発生後の活動の解析からも、地殻変動データとは独立に推定された。本震に伴う地震時滑りが大きかった領域では、小繰り返し地震活動がみられず非地震性滑りが完全に停止したように見えるのに対し、その周辺では、地震時滑りが大きかった領域に近いほど、本震直後から小繰り返し地震活動が活発化しており、立ち上がり鋭い余効滑りが進行しているものと推測できる。このような小繰り返し地震の解析から推定される余効滑りの空間分布パターンは、上述の地殻変動観測データの逆解析から推定された滑り分布と良い一致を

示す。

・2011年4月11日にいわき市で発生した地震(M7)の10日後から約50日間、余震域内にある深度1000m前後の2本の孔井を借用して水位変動を臨時観測した。観測された水位変動は体積ひずみにして約 $3 \times 10^{-10}/\text{mm}$ に相当する。観測期間中には27個の地震(M3.3~5.5,震源距離7.7~105km)に伴う水位変動が観測され,その変動量は,観測事例の92%に関して,食い違い弾性論による体積ひずみ理論値で説明できる。本震に伴う水位変化は8mと10mに達したが,これも本震による静的体積ひずみ変化で説明できる。地震に先立つ20分から3時間の間に8mmに満たない水位変動が約30%の観測事例に認められた。変動は有意であるものの,これが地震発生の前兆変動である証拠は無い。一関市,登米市,東松島市,高萩市,つくば大学構内での定常観測(水位,水温,ラドン濃度,CO2濃度)は2013年度まで継続しているが,地下水変動が検知可能な震源距離範囲・規模の地震は発生しなかった。

- (8)平成25年度の成果に関連の深いもので、平成25年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
R. Hino, D. Inazu, Y. Ohta, Y. Ito, S. Suzuki, T. Inuma, Y. Osada, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Kaneda,
Was the 2011 Tohoku-Oki earthquake preceded by aseismic preslip? Examination of seafloor vertical deformation data near the epicenter, Mar. Geophys. Res., 10.1007/s11001-013-9208-2, 2013.

- (9)実施機関の参加者氏名または部署等名:

日野亮太・三浦 哲・大槻憲四郎・松澤暢・長濱幸裕・木戸元之・内田直希・伊藤喜宏・太田雄策・
飯沼卓史・武藤潤
他機関との共同研究の有無:無

- (10)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:東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター
電話:022-225-1950
e-mail: zisin-yoti@aob.gp.tohoku.ac.jp
URL: <http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/>

- (11)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:日野亮太
所属:東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

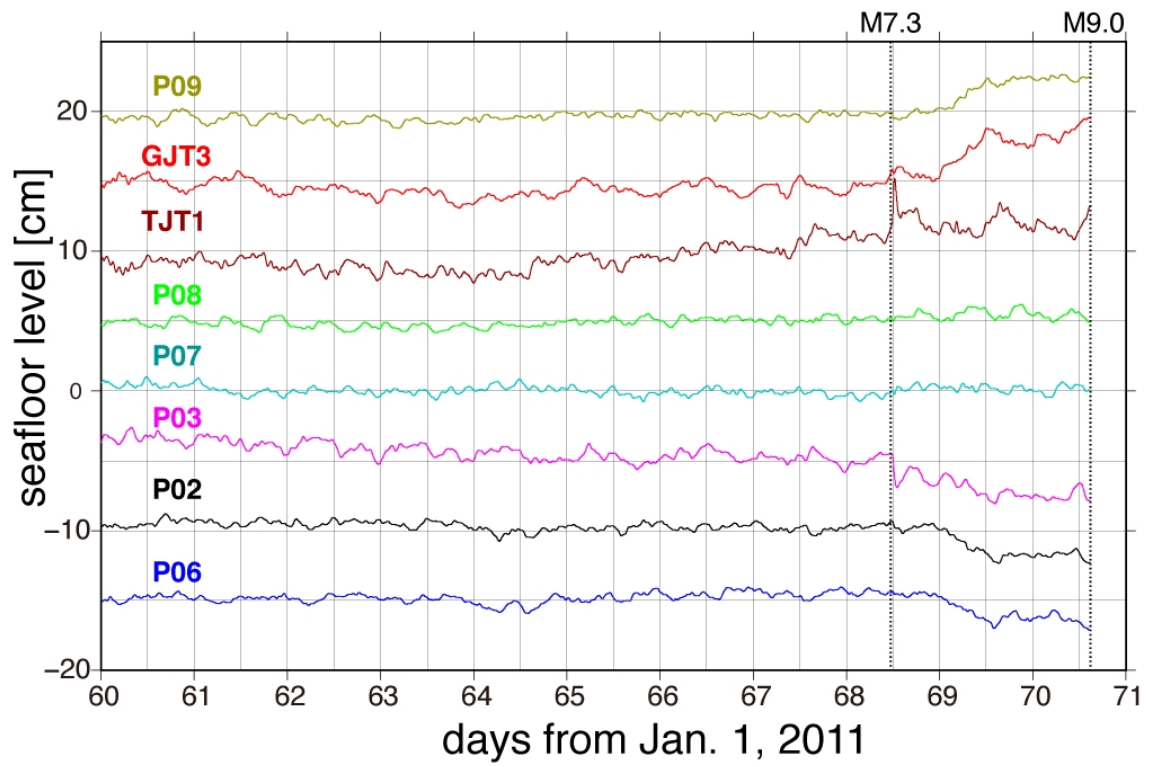


図1 . 2011年東北地方太平洋沖地震発生直前10日間の海底上下変動時系列

2011年東北地方太平洋沖地震の震源域直上に設置されていた8台の自己浮上式海底圧力計の連続データから、海洋起源の擾乱と、3/9の最大前震(M7.3)および3/10の前震(M6.3)による地震時変位を除いた。