

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22740287

研究課題名(和文)複合測地学データに基づく奥羽脊梁山脈直下のレオロジー構造に関する研究

研究課題名(英文) Research of rheological structure beneath the Ou-backbone Range based on the multiple geodetic data

研究代表者

太田 雄策(OHTA, Yusaku)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50451513

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：2008年岩手・宮城内陸地震後地殻変動を水準測量，稠密GPS観測網，および合成開口レーダ等による複合測地データにもとづき詳細に調べ，それらに基づいて下部地殻・上部マントルのレオロジー構造を詳細に調べた．その結果，広域地殻GPS変動から構築した粘弾性緩和モデルでは説明できない空間的に短波長・長波長の地殻変動場を見出すことに成功し，それらがそれぞれ局所的な余効すべりおよび地下のレオロジー構造を反映している可能性を示した．また，2011年東北地方太平洋沖地震にともなうひずみ異常分布を見出し，地下構造との関連性を示した．

研究成果の概要(英文)：We investigated the postseismic crustal deformation following the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake based on the precise leveling, dense GPS observation, and InSAR data. We investigated the rheological structure in the northeastern Japan arc based on the dense GPS network of far field from the focal region. In contrast, the near field of the focal region of the 2008 event, it is difficult to explain the some of the short-wave length crustal deformation. These anomalies will reflect the long-term aseismic slip in the shallower portion around the coseismic fault. Furthermore, we evaluated an anomalous crustal strain distribution in the Tohoku region associate with a step-like stress change induced by the 2011 Tohoku earthquake (Mw9.0). These strain anomalies may reflect the inhomogeneity of the rheology or stiffness of the crust.

研究分野：地球惑星科学

科研費の分科・細目：個体地球惑星物理学

キーワード：レオロジー構造 GPS 水準測量 合成開口レーダ 2011年東北地方太平洋沖地震

## 1. 研究開始当初の背景

2008年6月14日に岩手県・宮城県両県の県境付近で発生した2008年岩手・宮城内陸地震(Mj=7.2)は、西北西-東南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型の地震であり、多くの被害をもたらした。東北地方ではGPSデータにより奥羽脊梁山脈に沿った歪み集中帯の存在が以前から指摘されていた(Miura et al., EPS, 2002, 2004)。今回の地震は、この歪み集中帯の内部で発生した内陸地震である。近年、こうした測地的な歪み集中帯と内陸地震の発生の関連性が強く示唆されている(Sagiya et al., 2000)。さらに、今回発生した岩手・宮城内陸地震は栗駒山を中心とする活火山のごく近傍で発生した地震である。長谷川 他(2004)は、火山地域においてはマントルウェッジから供給される水の量が多いため、上部地殻を含めた地殻全体の軟化が発生し、局所的な短縮変形が周囲に比べて速く進行するのに対し、火山と火山の間では非弾性変形が相対的に小さいために応力集中が発生しやすく、大地震の発生に繋がるという定性的なモデルを提唱している。しかし今回の岩手・宮城内陸地震は、比較的火山体にごく地域においてM7クラスの大地震が発生した事例であり、その解釈は内陸地震の発生メカニズムを知る上で非常に重要である。Ohta et al., EPS, (2008)は、岩手・宮城内陸地震震源域に展開されていた国土地理院 GEONET 観測網、東北大学地震・噴火予知研究観測センター定常観測点、原子力安全基盤機構(JNES)、国立天文台水沢 VERA 観測所のGPSデータを統合処理し、キネマティックGPS解析を施すことによって余効変動成分を含まない純粋な地震時変動を精密に抽出する事に成功した。それら地震時変動場に基づき、矩形断層モデルを構築した結果、栗駒山直下では2m近い地震時断層滑りが生じていた事が明らかになった。更に申請者は単純矩形断層モデルでは説明ができない部分を断層面状の滑りの不均質性によるものと考え、Ohta et al., EPS, (2008)の断層モデル面を仮定した断層滑り分布を推定した。その結果でも矩形断層モデルと同様に栗駒山直下では2m程度の滑りが生じており、さらに最大滑りは栗駒山の東側4kmの深さ5km程度に求められ、その滑り量は9mに達している。Iinuma et al., GRL, (2009)はGPS大学連合による稠密GPS観測データに基づき、地震後に発生した余効変動の力源を余効滑りと解釈した時間依存モデルを示した。この様に岩手・宮城内陸地震では、地震時滑り分布、余効変動、地震波速度構造等のデータの統合的な理解が進みつつある。しかし、最大の問題は、最大9mに及ぶ滑りを生み出す歪みエネルギーを、火山体のごく近傍でなぜ蓄積できたのか、という点である。

## 2. 研究の目的

本研究では、この疑問を解明するために、粘弾性緩和に着目する。大地震が発生した直後は断層面において、本震時に滑らなかった部分が滑り遅れを解消するために余効滑りを起こす事に起因する余効変動が支配的である。しかし、時定数のより長い余効変動は下部地殻の粘弾性緩和によって引き起こされる。現在問題としている「火山体ごく近傍での高歪みエネルギーの蓄積」を理解する上で、火山帯周辺のレオロジーの空間分布を詳細に知ることは極めて重要であり、それらの理解に粘弾性緩和は非常に重要である。本研究では、この粘弾性緩和の時間発展を測地観測によって詳細に把握し、その時間発展と、地震学的に求められた速度構造から火山周辺のレオロジー構造を決定することを目的とし、最終的にはそれらのレオロジー構造に基づき、高歪みエネルギーの蓄積を引き起こした条件について考察を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

「奥羽脊梁山脈直下の下部地殻・上部マントルのレオロジー構造の解明」に向け、本研究は複合測地観測データ(GPS観測、水準測量、InSAR解析)に基づく岩手・宮城内陸地震震源域における粘弾性緩和の定量的な検出を試みる。平成22年度に水準測量を実施し、平成23年度以降は、合成開口レーダによる面的な地殻変動量およびGPSデータによる地殻変動場の時間変化を求めた。また、これら得られた地殻変動場を説明するレオロジーモデルを球殻成層構造モデルによって推定する。

## 4. 研究成果

平成22年度は、2008年岩手・宮城内陸地震の震源域における詳細な上下地殻変動場の把握を目指し震源域周辺における水準測量を行った。水準測量を行った路線としては国道342号線に沿った東西路線であり、その東端は一等水準点5444、西端は東北大学のGPS観測点(ICNS)に新設した水準点である。(図1)。

総路線長は28.3kmであり、この路線を2010年8月23日から27日の期間測量を行った。当該路線の中間地点までは既存点として一等水準点5444を含め公共測量点が計8点存在する。これらの公共測量点は国土地理院によって地震発生直後の2008年6月、10月と2009年6月に測量が行われているため2010年の測量により地殻変動を検出可能である。得られた水準点の変動は震源域に向かって顕著な沈降を示し、その沈降量は最大で17.5mmに達する(図2)。

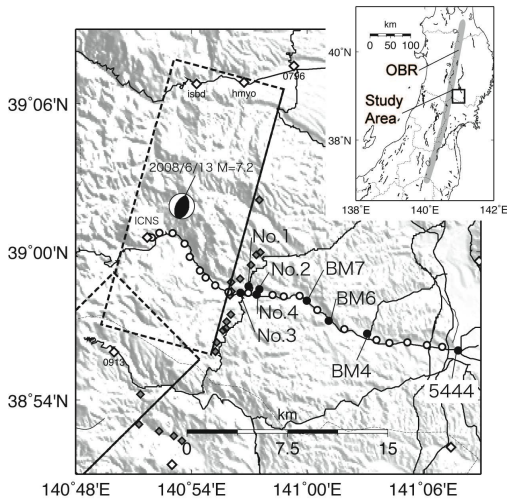


図1. 2008年岩手・宮城地震震源域における水準路線。黒丸が既存、白丸が新設の水準点をそれぞれ示す。

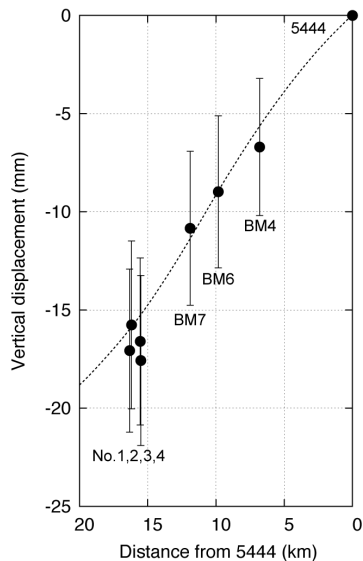


図2. 5444水準点を基準とした2009年6月から2010年8月までの間の上下地殻変動場。

図中の破線は Ohzono et al., *EPS*, (2012) が推定した粘弾性緩和モデルにより予想される同期間の上下変動量を示す。両者は良い一致を示し、GPS データから求められたモデルを水準測量からも支持する結果となった。

平成23年度においては、2011年3月11日に日本における観測史上最大のM9に達する東北地方太平洋沖地震が発生した。同地震の海溝における大きな地震時すべりによって、東北日本は東西方向に大きな伸張を受けた。このようなステップ状の応力変化が生じた場合、奥羽脊梁山脈下に存在すると考えられている低粘性領域は周辺領域と異なる応答をすると考えられる。すなわち地震間には低粘性である下部地殻の影響によって上部地殻は歪み集中帯として現れるが、今回の地震の様なステップ状の応力変化を受けた場合、低粘性領域では既に地震間の応力が緩和され

ているため、周辺よりも東西伸張の量が少ないことが想定される。平成23年度はこうした作業仮説の検証を主に実施した。具体的には GEONET および東北大学連続GPS観測点の東北地方太平洋沖地震による地震時ステップを計算し、仮定した矩形断層から期待される変動量を差し引くことによって残差ひずみ分布を算出した。その結果、奥羽脊梁山脈周辺において周辺域よりも伸張が不足する領域、すなわち低粘性領域が存在することを示唆する結果が得られた。しかし得られた残差ひずみ分布には表層地盤等の影響等も多く含まれ、それらを今後区分して議論を行う必要があることも同時に明らかになった。また平行して2008年岩手宮城内陸地震震源域の余効変動解析を行った。InSARの時系列解析手法を同地域に適用することによって粘性緩和に伴うと考えられる長期余効変動およびそれとは独立した長期余効すべりを見出した。

平成24年度は、合成開口レーダを用いた2008年岩手・宮城内陸地震震源域における地震後余効変動の検出とその解釈を主に行った。地震後余効変動を精密に捉えるためには、変位の時空間変化を詳細に知る必要がある。そのため解析にはPS (Permanent Scatterers) 干渉SAR時系列解析法を用いた。その結果、従来の干渉SAR解析では変位場を検出することが難しかった断層上盤側における比較的空間波長が短い地震後余効変動を明瞭に捉えることに成功した。また、断層下盤側における比較的空間的に長波長の変動も明瞭に捉えた(図3)。断層下盤側の変動は主に地震後の粘弾性緩和によって説明が可能である。一方で断層上盤側の空間波長の短い変動は断層面における非地震性すべり、もしくは火山に起因した地殻変動である可能性があることが分かった。これらの変動は、内陸地震発生後に様々な場所で短波長の余効変動が起きうることを示唆する結果である。また、粘弾性緩和によって説明が可能な断層下盤側の長波長変動は、震源域直下の粘弾性構造を把握するための重要な情報であるが、広域のGPSデータから求められた粘弾性緩和のモデルではそれらの全てを説明できず、震源域直下では特に上部地殻の厚さが薄い、もしくは下部地殻の粘性率が低いことを示唆する結果となった。

平成25年度は、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地震後の余効変動に伴うひずみ分布の詳細な時間発展解析を実施した。具体的には以下の手順の解析を実施した。まず国土地理院電子基準点データ(GNSSデータ)の1秒毎PPPキネマティック解析によって地震時変位のみを抽出し、それらと日座標値によって得られた余効変動時系列を差し引いた。これによって、地震直後からの余効変動成分を抽出し、さらにそれら余効変動成分から東北地方全域におけるひずみ分布を推定した。プレート境界型巨大地震の地震直後の余効



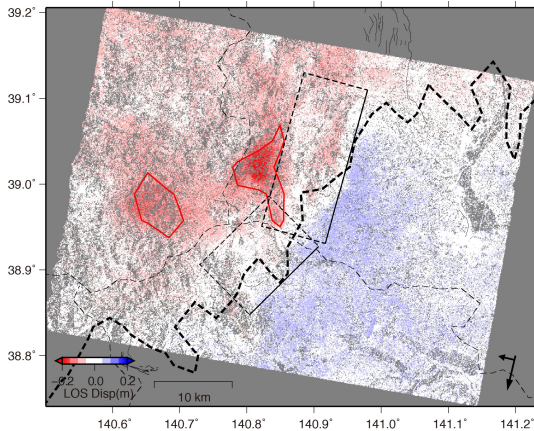


図 3 . ALOS/PALSAR 南行軌道データの PS-InSAR 時系列解析によって得られた地震後余効変動 . 2008 年 7 月 16 日を基準とした 2010 年 10 月 22 日までの累積変位を示す . 図中黒線は変位がゼロになるピボットラインを示す .

変動は、主に余効すべりが卓越すると考えられる . 東北地方太平洋沖地震の場合、余効すべりは主として沿岸よりも沖合のプレート境界で発生しており、この場合、ひずみ分布は大局的には東西伸長が卓越する膨張場であることが期待される . GNSS データから得られたひずみ分布は、大局的には膨張場であるものの、東北地方内陸部で特徴的な短波長変化を示し、局所的に周囲と比べて膨張量が伸び足りない領域が存在することが明らかになった . さらにシグナル・ノイズ比を僅かに超えるレベルであり、より精密なデータ整理が必要ではあるものの、蔵王周辺で南北短縮が東西圧縮よりも卓越するために、膨張ではなく収縮するような領域が地震後に存在していた可能性が明らかになった . 東北地方太平洋沖地震の地震直後の余効すべり速度は極めて大きい . そのため、このようなひずみ分布の不均質は応力の急激な除荷に対して、上部地殻の弾性定数や下部地殻、上部マントルの粘弾性層の粘性率の不均質等の応答がそれぞれ異なるために生じているものと考えられる .

##### 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

1 . Ohzono, M., Y. Yabe, T. Iinuma, Y. Ohta, and S. Miura, 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, 2012. (査読有)

2 . Okada, T., N. Umino, A. Hasegawa, and Group for the aftershock observations of the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008(研究代表者がグループ内に含まれる), Hypocenter distribution and heterogeneous seismic velocity structure in and around the focal area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, NE Japan-Possible seismological evidence for a fluid driven compressional inversion earthquake, *Earth, Planets and Space*, 64(9), 717-728, doi:10.5047/eps.2012.03.005, 2012. (査読有)

3 . 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*, 63(12), 1207-1211, doi:10.5047/eps.2011.07.016, 2011. (査読有)

4 . Ohzono, M., Y. Ohta, T. Iinuma, S. Miura, and J. Muto, Geodetic evidence of viscoelastic relaxation after the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, *Earth Planets and Space*, 64, 759-764 doi:10.5047/eps.2012.04.001, 2012. (査読有)

5 . 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. (査読有)

6 . 太田雄策, 三浦哲, 松村信介, 森俊行, 低価格 2 周波 GPS 受信機とデータロガーを用いた GPS 観測システムの構築, *測地学会誌*, 56(3), 101-106, 2010.(査読有)

[学会発表](計 11 件)

1 . 平田 雄一郎, 太田 雄策, 大園 真子, 三浦 哲, キネマティック PPP 時系列解析によって得られた 2011 年東北地方太平洋沖地震の余効変動にともなう特徴的ひずみ分布, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜, 2014 年 4 月 30 日 .

2. 大下佑也, 太田雄策, 大園真子, 岡田知己, 出町知嗣, 立花憲司, 三浦哲, 海野徳仁, PS-InSAR 時系列解析による 2008 年岩手・宮城内陸地震後の粘弾性緩和と局所的余効変動の検出, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ, 2013 年 5 月 21 日

3. 福田秀樹, 太田雄策, 島田誠一, 長谷見晶子, 立花憲司, 出町知嗣, 三浦哲, 加藤照之, 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, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ, 2013 年 5 月 21 日

4. 大下佑也, 太田雄策, 海野徳仁, 三浦哲, PS-InSAR および GPS 時系列にもとづく 2008 年岩手・宮城内陸地震後の長期的非正常地殻変動, 日本測地学会第 118 回講演会, 仙台, 仙台市福祉プラザ, 2012 年 11 月 2 日.

5. 大下佑也, 太田雄策, 海野徳仁, 三浦哲, PS-InSAR 時系列解析による 2008 年岩手, 宮城内陸地震後の長期的非正常地殻変動, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, 函館, 函館市民会館, 2012 年 10 月 17 日.

6. 大下 佑也, 太田 雄策, 三浦 哲, 出町 知嗣, 立花 憲司, 海野 徳仁, PS-InSAR 時系列解析から求めた 2008 年岩手, 宮城内陸地震後の地殻変動, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉, 幕張メッセ, 2012 年 5 月 23 日.

7. 出町知嗣, 立花憲司, 佐藤俊也, 三浦哲, 大園真子, 太田雄策, 2011 年東北地方太平洋沖地震発生後の東北大学 GPS 連続観測点の復旧作業について, 日本測地学会第 116 回講演会, 高山, 高山市民文化会館, 2011 年 10 月 26 日.

8. 太田雄策, 小澤拓, 大園真子, 三浦哲, InSAR データにより検出された 2008 年岩手, 宮城内陸地震後の長期的余効滑り, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 幕張メッセ, 2011 年 5 月 24 日

9. 出町知嗣, 立花憲司, 太田雄策, 三浦哲, 植木貞人, 長谷見晶子, 鹿目靖雄, 松島健, プリペイド携帯電話通信端末を利用した GPS 連続観測, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 千葉市, 幕張メッセ, 2011 年 5 月 24 日.

10. 太田雄策, 大園真子, 赤塚正樹, 小林竜也, 出町知嗣, 三浦哲, 立花憲司, 鈴木秀市, 小澤和浩, 鷺谷威, 山本淳平, 若杉貴浩, 村瀬雅之, 西村卓也, 小林知勝, 水準測量による 2008 年岩手, 宮城内陸地震後の上下地殻変動場(序報), 日本測地学会第 114 回講演

会, 宇治市, 京都大学宇治キャンパス, 2010 年 11 月 9 日

11. 太田雄策, 三浦哲, 松村信介, 森俊行, 低価格 2 周波 GPS 受信機とデータロガーを用いた GPS 観測システムの構築, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ, 2010 年 5 月 27 日

〔図書〕(計 1 件)

藤本博己, 木戸元之, 飯沼卓史, 長田幸仁, 日野亮太, 伊藤喜宏, 太田雄策, 東日本大震災を分析する 1. 地震・津波のメカニズムと被害の実態, 明石書店, ISBN978-4-7503-3823-1, 2013, p.80-p.89.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
太田 雄策 (OHTA, Yusaku)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 50451513