

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25350427

研究課題名(和文) 活断層によらない島弧地殻の変形様式の解明 -歪速度パラドックスの解消にむけて-

研究課題名(英文) crustal deformation system non the active fault slip

研究代表者

松多 信尚 (Matta, Nobuhisa)

岡山大学・教育学研究科・教授

研究者番号：40578697

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は測地測量で観測される地殻変動には弾性歪によるものだけでなく、永久変形によるものが含まれるという立場から研究がスタートした。当初は活断層周辺の地殻変動に焦点を当てる予定だったが、2014年神城断層地震の発生を受け、活断層そのものにもいわゆる固有地震を伴って地殻が変形するケースと、それより小さい地震や地震を伴わず地殻が変形するケースがあること、測地測量で観測される地殻変動は周囲の地殻変動のイベントの影響を受けながら変化することが判明した。本研究の成果は、活断層の運動による島弧地殻の変形は全体の变形の一部であることを示し、今後は包括した地殻の変形プロセスを考えていく必要性を示した。

研究成果の概要(英文)：Crustal deformation observed by geodetic survey is the sum of elastic strain and permanent strain. The schedule at the start of the study was to focus on crustal movements around active faults. However, the 2014 Kamiro fault earthquake occurred. In the earthquake, a surface rupture appeared, but it was a smaller than a characteristic earthquake. This proved that there are multiple cases of earthquakes occurring along the active fault. It was also found that the crustal deformation observed by geodetic survey changes under the influence of the surrounding crustal movement event. The results of this research show that the crustal deformation in the island arc due to the slip of active fault is part of the whole deformation system and showed the necessity to consider the comprehensive crustal deformation process in the next step.

研究分野：変動地形学

キーワード：活断層 神城断層 2014年神城断層地震 阿寺断層 台東縦谷断層 GPS観測

1. 研究開始当初の背景

日本では測地測量による100年程度の歪速度と地形で求まる数万年程度の歪速度に大きな差がある。測地で見られる変形の大部分が弾性歪として内陸島弧に蓄積されており、プレート境界で起きる巨大地震によって解放されることでこの差は生ずると考えられてきた。特に「歪集中帯」と呼ばれ、国土地理院のGPS観測(GeoNet)で顕著な短縮変形が認められる(Sagiya et al., 2000)。信濃川褶曲帯地域では、中新世の日本海拡大で生じた地殻の脆弱な部分に歪みが集中していると地質学の立場からは考えられてきた(佐藤, 1989)。この仮説が正しいとすれば、巨大地震の際には地震間の短縮変形と真逆のセンスで地殻が引張る必要がある。しかし、2011年の東北地方太平洋沖地震では巨大地震によって解放されると想定されていた弾性歪みの解放は認められず、東頸城丘陵で地震前に見られていた局所的な歪集中域は地震時および地震後の変動では周囲と異なる運動を観測していない(鷲谷ほか, 2012)。これは、測地測量でみられていた地殻変動のうち一定量は永久変形をしており、弾性歪として蓄積していないことを示唆する。そのような永久変形が起きている場所では歪が蓄積せず活断層が活動する地震による弾性歪の解放が起きない可能性(大地震は起きない!)と、永久変形の地域差は局所的な歪を内陸側の島弧地殻に蓄積させ、プレート間地震の一サイクルを超えて累積するため、活断層が運動する動力源がこの永久変形の地域差による可能性が推定される。

この問題は島弧地殻の活断層には末端が存在することにも関係する。断層運動があれば、その先端部には応力が集中し、割れ目が伝播すると考えられるので、断層の末端が永続的にほぼ不動に存在する理由は先端に集中した歪みを解消するシステムが存在することを示唆している。つまり、内陸地震の発生メカニズムは歪みの蓄積と解放というプレート境界型活断層と同じようなフレームで議論するのではなく、定常時の断層のクリープ運動による変形などによる永久変形に伴う局所的な歪蓄積、活断層の活動による永久変形、断層末端部などで全体が隆起するバルク状変形の変形様式を分けて議論するべきである。そのうち、活断層による変形様式が大地震を伴い、断層のクリープ運動による変形は狭い範囲が常時変形し、全体が隆起するバルク状変形は広範囲に時には中規模地震などを伴いながら変形すると考えられる。ここでいう中規模地震とは各活断層の活動が想定される固有地震より小

さい地震を指す。しかし、これは未だ仮説である。本研究はこの仮説を「活断層による長期間の変形および変形プロセス」の比較が可能な測地測量を行うことで「短期変形」に含まれる永久変形を定量的に見積り、島弧地殻の変形様式の地域差を定性的に明らかにすることで、変形様式をもたらす要因について考察する。

また、測地測量と地形地質の地殻変動量やパターンの比較を検討するには、このような永久変形がどのような時間スケールで継続的に続いているのかを確認する必要がある。つまり、内陸活断層の活動などによって内陸地殻の場の条件が変化をし、内陸における定常時の永久歪の空間的分布が時間変化する可能性を検証する必要がある。これは、ある場所はひずみ蓄積増加ステージにあるため、早い速度で活断層の活動を促すひずみが蓄積するのに対し、別のある場所ではひずみ蓄積静穏期にあるため、活断層の活動を促す顕著なひずみ蓄積が認められないなど、地形地質学的に求まるひずみ速度と測地学的なひずみ速度の関係は場所によって異なる可能性が考えられる。もちろんこの考えでも、測地学的な時間スケールで地震などの明瞭な地殻変動が起きていない期間にみられる変形は弾性歪と緩慢な永久変形の非弾性歪との和となるため、測地測量として観測される地殻変動を解釈するためには注意が必要となる。

また、研究開始後の2014年に長野県北部の糸魚川-静岡構造線北部に該当する神城断層でマグニチュード6.7の地震が発生した。この地震は2014年長野県北部の地震と命名されているが、長野県は独自に2014年神城断層地震と称しているため、本報告では後者の名称を使用する。この地震に伴い地表に最大変位1mの地表地震断層が既知の神城断層に沿って約9kmの範囲にのみ出現した。この地震は推定されていた固有地震より小さい地震で地表に痕跡を残した地震に該当し、本研究対象として加えた(詳細は後述)。

2. 研究の目的

以上の背景を解決するために、三本の研究の柱を立てた。第一は、永久変形の場が条件によって時間変化をするのかの検証、第二は、クリープによる地震を伴わない定常的な永久変形をもたらす局所的なひずみの蓄積が活断層の分布や活動に与える影響、第三は、活断層の固有地震による地殻変動とそれ以外の地殻変動を分離しその関係解明である。

第一について、鉛直横ずれ断層が多数分布する中部地方において、代表的な左

横ずれ断層である跡津川断層・阿寺断層・根尾谷断層に着目すると、活断層の地形地質学的な平均変位速度はともに A 級の活断層で大きな速度差はない。しかし、測地測量で求まる変位速度は、跡津川断層、根尾谷断層では大きな値を示すのに対し、阿寺断層ではあまり活動していないと考えられていた。これが事実だとすれば、跡津川断層や根尾谷断層が活動期であるのに対して、阿寺断層は静穏期にあたると考えられ、永久変形の場合条件によって時間変化をすると解釈できる。しかし、阿寺断層の観測点は地形的な制限から北側にあまり分布していないため、測点を増やし検証する必要があった。また、糸魚川静岡構造線は 2011 年東北地方太平洋沖地震の前に重点調査によって断層を横断する GPS 観測が実施されていた。そこで、2011 年以前、2011 年以降 2014 年神城地震以前、2014 年神城地震以降の変化を見ることで、ひずみ場の時間変化を検証した。

第二について、プレート間の弾性歪を蓄積させず永久変形が進行するケースとして、クリープ断層である台湾東部の台東縦谷断層を対象とする。この断層は定常的にクリープ運動をすることが知られている一方で 1951 年には地表地震断層を出現させる花東地震を起こしている。採択以前にこの断層を横断する約 30 km の測線で 100m 間隔の稠密水準測量をすでに 4 年間行っていた (Matta et al., 2011)。本研究では、継続的に進行する永久変形によって、どのように局所的なひずみが蓄積し、それと 1951 年の花東地震の関係を考察する。

第三について、2014 年神城断層地震は地表地震断層の分布調査から、地形学的に活動度が高い既知の神城断層の北端部は変位していない、地表地震断層の北端部は既知の神城断層の中では活動度が高い断層から分岐する活動度の低い断層部分にあたる、地表地震断層の北端部は盆地の北端部と一致する、既知の神城断層と地表地震断層はかなりの部分で一致する、地表地震断層の南部では既知の神城断層より山際に断層が出現した、という知見を得た。これは、固有地震による地殻変動と、2014 年神城断層地震による地殻変動が一致しないことを示唆する。そこで、本研究では古地震調査や地形調査を実施し、両者の関係について明らかにした。

### 3. 研究の方法

研究は地形地質と測地測量の独立した 2 つの方法で実施した。

#### 1. 詳細な長期変形速度分布の取得

変動地形学的な手法を用いて、変位量分布を明らかにした。

空中写真を用いた地形判読を行い変位地形の認定および、変位基準となる地形を抽出する。

画像マッチングソフトである高解像度オルソモザイク画像処理ソフトである Photoscan を用いて、UAV など得られた空中写真から地形計測を行う。

既存データの整理と変位基準の年代をもとめる野外調査および掘削調査を実施する。

それらを元に最終間氷期以降の変位量分布を作成する。

### 2. 稠密な測地測量

変位地形のデータは断層沿いの線データであるため、それと比較できる精度で地殻変動を測量する必要がある。

糸魚川静岡構造線や阿寺断層で断層を横切る稠密 GPS 観測の測線を設定する。

台東縦谷断層で稠密水準測量の測線を設定し、クリープ運動末端部の発見と、その振る舞いを測量する。

地上レーザー測量を用いて面的に測量を実施する。

### 4. 研究成果

第一について、阿寺断層では断層トレスを横断して数 km の平均間隔で高密度 GNSS ネットワークを構築して観測した。2014 年 1 月から 2016 年 10 月までの観測の結果、この地域では 2011 年の東北沖地震の余効変動と南海トラフのプレート間結合による影響が支配的であるが、これらの変動を除去した結果、地形地質から推定される変位速度と調和的な左横ずれ成分の変動を検出することができた。このことは、周囲の A 級活断層とは異なり阿寺断層は歪を蓄積させていないという見解が誤りだったことを示している。2014 年の神城断層周辺の糸魚川静岡構造線北部は 2002 - 2010 年にかけて GPS のキャンペーン観測が行われており、局所的な東西短縮変形がみられ、低角東傾斜の逆断層が地表付近までクリープしている可能性が指摘されていた (国土地理院, 2010)。2014 年神城断層地震は高角東傾斜の断層であり、測地測量から推定された断層とは異なっている。地震後、神城断層を挟んで 4 - 7 mm/年の短縮が認められ、この値は地震前とは異なっており神城断層地震の余効変動と考えられる。地震を挟んだ変化は犀川丘陵の東側を区切る長野盆地東縁断層でもみられ、その値は約 6 mm/年である。この値は 2011 年東北地方太平洋沖地震以前に観測された値の二倍以上になる。これらの事実は 2014 年神城断層地震以降、この地域のひずみ蓄積速

度が変化したことを示し、ひずみ場が時間変化をすることを示唆する。

第二について、台東縦谷断層がクリープ運動をしている区間は玉里付近から池上付近以南と考えられていた。そこで、その末端部分を探すべく、北側に測線を追加した。その結果、約 2.8 mm/年の定常的なクリープ運動を行っている玉里より北側に位置する赤科山や瑞穂において、年ごとに断層を挟んだ地殻変動のパターンや値が異なっていることを見出した。これは、クリープ運動の末端部付近では局所的なひずみの蓄積とその解放が短期間の間に繰り返し起きている可能性を示唆している。測線は北側に 4 測線、南側に 2 測線追加し、計 10 測線にしたが、完全にクリープしていない地点を見つけることは出来なかった。東竹地区で写真測量と地上レーザー測量を実施した。これらの手法の問題点はクリープ運動をしている断層の場合、座標自身が変形をしてしまうため、比較する二期間の位置を自動で合わせることが難しいことであり解決しなかった。

第三について、研究目的で触れたが、2014 年神城断層地震はこの地域の固有地震に対して一回り小さな地震であったものの明瞭な地表地震断層が出現した。この一回り小さな地震で出現した地表地震断層は、固有地震の時に出現すると思われるより変位量の大きな活断層とは位置が一致しない場合も多い。トレンチ掘削調査を実施すると、①300 年前にも同様な地震が存在する、②蕨平地区の地表地震断層では、明らかに変位量が異なるより大きな地震が存在する、ことがわかった。すなわち、神城断層では地表に断層が出現する大地震が少なくとも 2 種類あり、それぞれに活動する断層が微妙に異なる可能性が指摘できる。仮に、地表の変形様式の違いが固有の地震を示すのであれば、活断層の分布から、その断層で発生する地震が予測できることが期待できる。同様な議論が台湾の台東縦谷断層でもできる。台東縦谷断層の中部に位置する東竹地区では過去のずれ量が累積した変動地形が残存しており、水準測量で測量される変位パターンと、計測される変形した地形のパターンとが一致していない。この地域はクリープ運動と地震運動の少なくとも二種類の变形プロセスが存在し、クリープ運動は 3 年間にわたりほぼ同じ変形がみられる。力がかかり岩盤が食い違う現象という点でクリープ運動も断層変位を伴う地震活動としてとらえるならば、台東縦谷断層は複数の規模の違う地震(ずれ)を経験し、その変位様式が複数ある断層と位置付けることができる。すなわち、ずれ時のずれ量が小さい地震として、

2014 年神城断層地震と台東縦谷断層のクリープ運動とを、ずれ時のずれ量が大い地震として、予測された神城断層地震と 1951 年の花東縦谷地震とを対応させ同一視できるならば、複数のタイプの地震がそれぞれ固有の活断層トレース(地表変形プロセス)をもつことを示唆する。

#### 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 8 件)

1. Takada Youichiro・Sagiya Takeshi・Nishimura Takuya (2018) Interseismic crustal deformation in and around the Atotsugawa fault system, central Japan, detected by InSAR and GNSS, Earth, Planets and Space, 70, 1-12 (査読有)
2. Zhang Xuelei・Sagiya Takeshi (2017) Shear strain concentration mechanism in the lower crust below an intraplate strike-slip fault based on rheological laws of rocks, Earth, Planets and Space, 69, 1-12 (査読有)
3. Hayakawa, Y. S., Kusumoto, S., Matta, N. (2016). Application of terrestrial laser scanning for detection of ground surface deformation in small mud volcano (Murono, Japan). Earth, Planets and Space, 68(1), 114. (査読有)
4. 石黒聡士・熊原康博・後藤秀昭・中田高・松多信尚・杉戸信彦・廣内大助・渡辺満久・澤祥・鈴木康弘 (2016) UAV による空撮と SfM-MVS 解析による地表地震断層の地形モデル作成とその精度, 日本リモートセンシング学会誌 36, 107-116. (査読有)
5. 廣内大助・松多信尚・杉戸信彦・熊原康博・石黒聡士・金田平太郎・後藤秀昭・楮原京子・中田高・鈴木康弘・渡辺満久・澤祥・宮内崇裕・2014 年神城断層地震変動地形調査グループ (2015) 糸魚川 - 静岡構造線北部に出現した 2014 年長野県北部の地震(神城断層地震)の地表地震断層, 活断層研究, 43, 149-162. (査読有)
6. 杉戸信彦・谷口 薫・松多信尚・澤祥・田力正好・野澤竜二郎・皆黒 剛 (2015) 白馬村北城新田および大出における神城断層の平均変位速度と活動時期の検討, 活断層研究, 43, 109-118. (査読有)

7. 村瀬雅之・松多信尚・Lin Cheng-Hong (2014)精密水準測量によって検出された台湾台東縦谷断層中部におけるクリープ滑りの加速イベント(2010-2013), 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要. 地球システム科学, 49, 231-242. (査読無)
8. Murase, M., Matta, N., Lin, C. H., Chen, W. S., & Koizumi, N. (2013). An episodic creep-slip event detected by precise levelling surveys in the central part of the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan, in 2011-2012, Tectonophysics, 608, 904-913. (査読有)
- 〔学会発表〕(計 9 件)
1. 廣内大助・松多信尚・石山達也・杉戸信彦・竹下欣宏・水谷光太郎・安江健一・藤田奈津子・澤祥・道家涼介・佐藤善輝・堤浩之・越後智雄・池田一貴・鈴木康弘(2018)糸魚川 静岡構造線活断層帯神城断層中北部における断層活動, 日本地理学会, 3月, 東京
2. 鷺谷威・熊谷光起・張学磊・Angela Meneses-Gutierrez・松廣健二郎・奥田隆(2017)長野県北部地震(Mw6.3)後の地殻変動の変化, 日本測地学会, 10月, 瑞浪
3. 熊谷光起・鷺谷威・松多信尚(2017)稠密 GNSS 観測から推定される阿寺断層の応力蓄積過程, 日本測地学会, 10月, 瑞浪
4. 松多信尚(2017)活断層分布と活動度からみた吉備高原の安定性, 日本地質学会, (招待講演), 9月, 愛媛
5. HAYAKAWA Yuichi S. ・ KUSUMOTO Shigekazu ・ MATTA Nobuhisa (2017) Deformations of a small mud volcano revealed by multi-temporal terrestrial laser scanning , EGU, 4月, オーストリア
6. 廣内大助・松多信尚・安江健一・竹下欣宏・道家涼介・佐藤善輝・石村大輔・石山達也・杉戸信彦・塩野敏昭(2017)糸魚川 静岡構造線活断層帯神城断層北部における断層活動, 日本地理学会, 3月, 東京
7. 澤祥・松多信尚・渡辺満久・鈴木康弘・中田高(2015)2014年長野県北部の地震(神城断層地震)による地表地震断

層の位置と既存の活断層との関係, 日本地理学会, 3月, 東京

8. 松多信尚・村瀬雅之・西川由香・陳文山・林正洪(2014)台湾・台東縦谷断層における東竹付近のクリープ運動, 日本活断層学会, 10月, 仙台
9. 廣内大助・安江健一・道家涼介・佐藤善輝・杉戸信彦・松多信尚(2014)阿寺断層帯中部における後期更新世以降の断層運動 - 中津川市加子母二渡地区トレンチ調査 -, 日本地質学会, 9月, 鹿児島

〔図書〕(計 1 件)

1. 木股文昭・松多信尚, 2016, 東濃地方の地震とその災害, 東濃地震科学研究所, 95pp

〔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  
松多 信尚 (Matsuta Nobuhisa)  
岡山大学・大学院教育学研究科・教授  
研究者番号: 40578697
- (2)研究分担者  
鷺谷 威 (Sagiya Takeshi)  
名古屋大学・減災連携研究センター・教授  
研究者番号: 50362299

(3)連携研究者  
( )

研究者番号：

(4)研究協力者 ( )