

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Inelastic deformation in the Niigata-Kobe Tectonic Zone based on GPS observation before and after the 2011 Tohoku-Oki Earthquake
(2011年東北地方太平洋沖地震前後のGPS観測に基づく新潟-神戸ひずみ集中帯の非弾性変形)

氏 名 MENESES GUTIERREZ Angela Del Valle

論 文 内 容 の 要 旨

The Niigata-Kobe Tectonic Zone (NKTZ) is a 500 km long and 100km wide structure along the east coast of Japan Sea, which shows localized geodetic contraction (10^{-7} /yr, Sagiya et al. 2000), one order of magnitude larger than the long-term deformation rates in the area (10^{-8} /yr, Wesnousky et al., 1982). Although various hypotheses have been proposed, the origin of strain concentration in this area is not well understood (e.g. Iio et al., 2002; Hyodo and Hirahara, 2003; Yamasaki and Seno; 2005).

The 2011 M_w 9.0 Tohoku-oki earthquake caused instantaneous E-W extension and significant postseismic deformation over Northeast Japan, including the NKTZ. The occurrence of this earthquake provides the opportunity to examine how inland Japan, and in particular the NKTZ responds to different kinematic boundary condition, that is, the different stages of the earthquake cycle at the Japan Trench.

The classical elastic rebound theory (Reid, 1910) states that interseismic and coseismic deformation patterns are symmetrical to each other. However, comparison of the coseismic strain change with the preseismic strain change along the 37.0°N and 37.5°N latitudes showed that localized contraction on NKTZ before the earthquake was not recovered elastically in the coseismic deformation. This suggested that the deformation of NKTZ contains significant inelastic contribution.

Deformation patterns before and after the Tohoku-oki earthquake based on GPS observation were reviewed in order to understand the origin of the strain concentration in the NKTZ. At first, I analyzed data from the GEONET array for the whole NE Japan and then, I concentrate in a dense GPS array in

the Niigata area, which contains additional continuous and campaign stations. Deformation was studied during 4 time periods for the GEONET data: one preseismic (1997-1999) and three postseismic periods (2011/6-2012/5; 2012/6-2013/5; 2013/6-2014/5). Deformation from dense GPS array was analyzed on one preseismic period (2008/3/1-2011/2/28) and one postseismic (2013/3/1-2016/3/29).

Horizontal geodetic strain rate distributions were inverted from horizontal velocities for each time period using the method developed by Shen et al. (1996). In this method a distance decay constant is included to control the weight among the observation. Average distance between GEONET stations is approximately, 25 km, thus a distance decay constant of 25 km was chosen. I concentrated on the E-W geodetic strain rate distributions before and after the Tohoku-oki earthquake, considering that the strain concentration in the NKTZ is mostly an E-W feature. Crustal scale of deformation associated with interplate coupling is generally in the order of hundreds of kilometers, on the other hand, the deformation observed in NKTZ is constrain within 100 km. Therefore, different spatial scales characterize crustal deformation of the Japan Islands. To differentiate these behaviors, the geodetic E-W strain rate was decomposed into long and short wavelength components. I used a moving average filter with a radius of 65km to extract the long component. The short wavelength component is the residual between the observed strain and the long wavelength component.

The long wavelength components showed opposite behavior before and after the Tohoku-oki earthquake, that is general E-W contraction in the preseismic and E-W extension in the postseismic. This deformation is attributed to the interplate locking at the plate interface for the preseismic period and afterslip and/or viscous relaxation of the asthenosphere periods. On the other hand, the existence of a persistent contraction in the short wavelength component before and after the Tohoku-oki earthquake, with an amplitude around $4\sim 10 \times 10^{-8}/\text{yr}$, was found in NKTZ. These observations suggest that the localized contraction along the NKTZ is a persistent feature independent of the plate interaction at the subduction zone.

Persistency of the concentrated contraction suggests that the deformation accumulates in geological time. Estimated geological strain rates in inland Japan are in the order of $10^{-8}/\text{yr}$ (e.g. Wesnousky et al., 1982; Sato, 1989; Shen-tu et al. 1995), which is consistent with the results obtained in this study for the short wavelength geodetic strain rate. Thus, extraction of long-term deformation from short-term geodetic observation was demonstrated in this study.

I interpreted that the persistent localized contraction in NKTZ is mainly caused by an aseismic fault slip in the crust. This idea is in agreement with the background compressional stress in the area (e.g. Terakawa and Matsu'ura, 2010). Reverse faulting in Northeast Japan started due to a process of tectonic inversion 3 Ma ago, after the normal faults developed during the extension of the Japan Sea were reactivated with opposite motion during a compressional stage (Sato, 1994). Although the origin of such compressional stage is not well understood, the consistency between the geologic strain rate

and the inelastic geodetic strain rate in NKTZ suggests that such process is still ongoing.

I modeled the localized deformation during the preseismic E-W short wavelength strain rate component from the GEONET using a dislocation in an elastic half space (Okada, 1992). Although the dip of the dislocation could not be constrained well, I found that the deformation can be explained by a reverse fault cutting the lower crust and part of the upper crust with a slip rate greater than 8 mm/yr.

Analysis of data from a dense GPS array in the Niigata region shows localized contraction in Mid-Niigata (Chuetsu), where additional sites are located, within 40 km before and after the earthquake. However, differences in the amplitude and horizontal location of the localized deformation suggest that elastic heterogeneities of the crust might affect the deformation in Mid-Niigata. Localized deformation in the preseismic and postseismic period was modeled considering an east dipping fault and an elastic heterogeneity. It was found that the data is better explained by a fault cutting through the whole crust at a dipping angle of 30-40° with a slip rate of approximately 15 mm/yr and an elastic heterogeneity with a horizontal width of 50km located above the fault. Contribution from each process peaks at approximately 100nanostrain/yr. Although this model is simple, it is effective in showing how localized elastic and inelastic deformation coexist. On the other hand, horizontal displacement rate around a dense GPS campaign array in southern-central Niigata (Joetsu-Chuetsu) shows additional contraction in a very narrow region in the preseismic period, which agrees with the location of active folding. However, such pattern was underestimated in the strain rate distributions analysis.

Analysis of crustal deformation patterns before and after the Tohoku-oki earthquake demonstrated that inelastic processes play a significant role in the deformation of NKTZ, and the whole Japan island arc. It also has important implications for elastic strain budget regarding seismic cycle at the plate boundary and seismic potential of the Japan islands. Previous studies assumed that the geodetic data in inland Japan was a direct measure of the elastic strain accumulation due to interplate locking. A large portion of the contraction at NKTZ is inelastic, and direct interpretation of strain rate as seismic moment accumulation leads to overestimation of seismic potential at NKTZ. On the other hand, interplate locking at the plate interface needs reevaluation. If we take inelastic contribution into account, recurrence interval of M9 class earthquakes at the Japan Trench is estimated as 300-500 years, which is consistent with the lower limit of the geologic estimate (400~800 years) based on tsunami deposits.

主論文の要旨（日本語訳）

論文題目：Inelastic deformation in the Niigata-Kobe Tectonic Zone based on GPS
observation before and after the 2011 Tohoku-Oki Earthquake

氏 名：MENESES GUTIERREZ Angela Del Valle

新潟-神戸ひずみ集中帯（The Niigata Kobe Tectonic Zone, NKTZ）は、日本海東縁に沿った長さ約 500km、幅約 100km の変形集中帯である（Sagiya et al., 2000）。NKTZ のひずみ速度は 10^{-7} /年のオーダーで、これは地質学的に推定された長期的な変形速度よりも 1 桁大きい（Wesnousky et al., 1982）。この変形集中帯の成因について様々な仮説が提示されたが、十分な理解が得られていなかった（e.g. Iio et al., 2002; Hyodo and Hirahara, 2003; Yamasaki and Seno, 2005）。

2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震（ M_w 9.0）は、NKTZ を含む東北日本全域にほぼ瞬間的に東西伸張変形をもたらすとともに、同じセンスの顕著な余効変動を生じた。この巨大地震は日本列島の内陸部、特に NKTZ が、日本海溝における地震サイクルの異なるステージで生じる様々な境界条件の下で、どのような変形応答をするか調べる貴重な機会をもたらした。

Reid (1910) の古典的な弾性反発説では、地震間の地殻変動と地震時の地殻変動パターンは逆転し、対称的な分布を示すと期待される。しかしながら、北緯 37.0 度および 37.5 度の線に沿って、東北沖地震前のひずみ速度分布と地震時の地殻ひずみ変化を比較すると、地震前に NKTZ に局在していた短縮変形は地震時に回復しておらず、地震前の局所的な短縮変形が非弾性的な寄与を有意に含むことを示す。

本研究では、GPS 観測データを用いて東北沖地震前後の地殻変動パターンを調査し、NKTZ におけるひずみ集中の原因の理解を試みた。そのため、東北日本における GEONET 観測網のデータおよび新潟地域に設置された稠密 GPS 観測アレーの連続観測データおよびキャンペーン観測データを使用した。GEONET データについては、東北沖地震の前後の 4 つの期間（1997～1999, 2011/6～2012/5, 2012/6～2013/5, 2013/6～2014/5）について地殻変動分布を求めた。一方、稠密観測データについては、地震前（2008/3/1～2011/2/28）および地震後（2013/3/1～2016/3/29）の期間を解析対象とした。

まず、Shen et al. (1996) の方法を用いて、地殻変動速度データからひずみ速度の分布を求めた。GEONET の平均観測点間隔が 25km であることを考慮し、ひずみ速度計算の際

に用いる距離減衰定数を 25km とした。本研究では、NKTZ における変形集中が東西短縮であることを考慮し、東西方向のひずみ速度分布に注目した。プレート境界に起因する地殻変動が 100km 以上の空間波長を持つのに対し、NKTZ の変形が 100km 以内の範囲に集中していることから、日本列島の地殻変動には異なる空間波長を持つ変形の寄与が認められる。そこで、地殻ひずみ分布の長波長成分と短波長成分を分離することで、変形特性の空間スケール依存性の抽出を試みた。具体的には、各 GPS 観測点の変位速度ベクトルから求めた東西方向のひずみ速度の分布に、半径 65km の範囲を対象とする移動平均フィルターを適用してひずみ速度分布の長波長成分を求めた。また、元の分布から長波長成分を差し引くことで短波長成分を求めた。

ひずみ速度分布の長波長成分は、東北沖地震の前後で変形のセンスが逆転した。すなわち、地震前には広域的な東西短縮変形が、地震後には東西伸張変形が見られる。この変形は地震前には日本海溝におけるプレート間固着、地震後にはプレート境界の余効すべりやアセノスフェアの粘弾性緩和により、陸域の島弧地殻が弾性変形した影響と考えられる。一方、短波長成分に注目すると、NKTZ では東北沖地震の前後を通して $4\sim 10 \times 10^{-8}$ /年の短縮変形が生じていた。この観測結果は、NKTZ に局在化する短縮変形が、日本海溝におけるプレート沈み込みの影響を受けない、永続的なものであることを示す。

NKTZ の短縮変形の永続性は、この変形が地質学的時間にわたって累積性を持つことを示唆する。日本海東縁部でのひずみ速度は 10^{-8} /年のオーダーであり（例えば Wesnousky et al., 1982; 佐藤, 1989; Shen-Tu et al., 1995）、GPS 解析から求められた短波長のひずみ速度と整合的である。すなわち、本研究は短期的な測地観測データから長期的な地殻変形成分の分離に成功したと言える。

次に、この NKTZ における局在化した短縮変形を地殻内の非地震性断層すべりによる解釈を試みた。この考えは、この地域の広域応力場が東西圧縮性であること（例えば Terakawa and Matsu'ura, 2010）と整合している。東北日本では、3Ma 頃から東西圧縮の応力場が卓越するようになり、日本海拡大時に形成された正断層がテクトニックインバージョンにより逆断層として再活動している（Sato, 1994）。東北日本における東西圧縮応力場の起源は必ずしも解明されていないが、地質学的なひずみ速度と測地学的に推定された非弾性ひずみ速度が整合的であることは、地質学的時間スケールで生じてきた変形が現在も継続していることを示唆している。

本研究では、Okada (1992)の半無限弾性体におけるディスロケーションモデルを使用し、GEONET データから求めた地震前の東西ひずみ速度分布の短波長成分を再現するような断層パラメータを推定した。その結果、観測されたひずみ速度分布から断層の傾斜角は十分拘束できないが、下部地殻全体および上部地殻の一部にまたがる逆断層が

8mm/年以上の速度ですべてる場合に観測データを再現できることが分かった。

新潟県における稠密 GPS 観測アレーデータの解析からは、新潟県中越地域において、変形集中が東西方向約 40km の範囲で起きていることが明らかになった。地殻ひずみ速度の短波長成分の分布は東北沖地震の前後で振幅や位置が変化しており、非弾性変形に加え、地殻の弾性的な不均質構造の影響もあると考えられる。地震前および地震後の局所的な歪み速度分布を、東傾斜の逆断層（非弾性変形）と弾性的な不均質構造の影響の重ね合わせで再現することを試みた。その結果、地殻全体を断ち切る傾斜角 30~40 度の逆断層運動（すべり速度は約 15mm/年）と幅約 50km の範囲に弾性定数が周囲より小さい異常域を仮定すると、非弾性変形と弾性不均質がそれぞれ約 10^{-7} /年のひずみ速度異常を生じ、観測データを再現する。このモデルは単純化したものであるが、地殻変動データが弾性不均質と非弾性変形の効果を反映していることを示す。一方、上越・中越地域で行われた GPS の稠密キャンペーン観測結果は、地震前の期間に、非常に狭い範囲でさらなる変形集中が生じており、その分布は活褶曲の分布と整合的である。こうした結果は、観測点間隔の大きい連続観測データの解析では見落とされていたものであり、内陸部における稠密測地観測の重要性が示された。

東北沖地震前後の地殻変動解析結果から、NKTZ だけでなく日本列島の地殻変形において非弾性変形が重要な役割を果たしていることが明らかとなった。非弾性変形は、プレート境界の地震サイクルに伴う弾性ひずみ収支や日本列島の地震ポテンシャル評価に対して重要な意味を持つ。従来の多くの研究では、日本列島内陸の地殻変動をプレート境界の固着の直接的な影響として解釈していたが、今後、内陸部の非弾性変形の影響を考慮して見直す必要がある。NKTZ では顕著な短縮変形が生じているが、ここでの地殻変形の大部分は非弾性的に生じており、地殻ひずみ速度をそのまま地震ポテンシャルの評価に用いると過大評価となってしまう。一方、陸域の測地データに基づく沈み込みプレート境界の固着分布についても再評価が必要となる。非弾性変形の影響を考慮して 2011 年東北地方太平洋沖地震クラスの巨大地震の再来間隔を推定した結果、300~500 年という値が得られた。この値は津波堆積物に基づく地質学的な推定値 (400~800 年) の下限と整合的である。