

2011年東北地方太平洋沖地震後の 関東平野南部の局所的な隆起に関する検討

石塚師也

深田地質研究所

The study about local surface uplift around the southeast of the Kanto plain
after the 2011 Tohoku earthquake

ISHITSUKA Kazuya

Fukada Geological Institute

要旨：これまでの研究により、本震後から現在にかけて太平洋沖の地域では一様に隆起していることが知られているが、本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震後の約3年間における関東平野の地表変動をGNSSデータとPS干渉SAR解析を用いてマッピングしたところ、関東平野南部で年間5mm程度、局所的に隆起量が大きい地域を特定した。この局所的な隆起域は、約30×50km²の範囲で発生しており、不均質な空間分布をもつことが明らかとなった。また、局所的な隆起は、特に本震後1-2年間に顕著であり、次第に減衰する傾向をもつ。局所的に隆起が発生した地域では、本震後より地下水位が上昇していることが分かっており、震源断層と関東平野南部の距離の関係や関東平野の地下構造を鑑みると、浸透率の変化に伴う地下水位の上昇によって、局所的な隆起が引き起こされたことを示唆している。本研究は、地震による浸透率変化に伴う地表隆起を捉えた最初の例である可能性がある。

キーワード：2011年東北地方太平洋沖地震、GNSS、PS干渉SAR解析、地表変動、地下水

Abstract: We investigated three-year post-seismic surface displacement of the 2011 Tohoku earthquake around the Kanto Plain, using a global positioning system network and persistent scatterer interferometry of TerraSAR-X data. Uniform uplift owing to viscoelastic relaxation and afterslip on the plain has been reported previously. In addition to the general trend, we identified areas where surface displacement velocity was faster than surrounding areas, with as much as ~5 mm/year decay over time. The local uplift areas were about 30×50 km², and showed complex a spatial distribution with irregular shape. Based on the observed groundwater level increase, we deduced that the local ground uplift was induced by permeability enhancement and pore pressure increase of the aquifer system, attributable to the mainshock vibration. The study is the first observation to reveal ground displacement caused by permeability enhancement from an earthquake.

Keywords: the 2011 Tohoku earthquake, GNSS, PSInSAR, surface displacement, groundwater

1. はじめに

2011年3月11日に発生した2011年東北地方太平洋沖地震は、Mw9.0と日本列島周辺で観測された地震では最も大きく、日本列島各地に様々な爪

痕を残した(図1)。1つの大きな変化は、地表変動傾向の変化である。地震時には震源断層の方向(東向きおよび鉛直下向き)に向かって地表変動が発生した(Ozawa et al., 2011)。国土地理院が運用するGNSSネットワーク(GEONET)では、水

平方向に最大約 5.3 m, 鉛直方向に最大約 1.2 m の地殻変動が観測されている。

このような日本列島規模の地殻変動以外にも, 局所的な地殻変動に関する研究が行われ, 地震時の地殻変動に関する研究に新たな知見を与えている。例えば, 新潟地域では, 地殻の弾性的性質の不均質性に応じて, 地表変動量が異なっていることが報告されている (Nishimura et al., 2016)。また, 東北地方の活火山では, 地震時の引張場に応じて, 活火山において楕円形の局所的な沈下が発生したことが明らかとなっている (Takada and Fukushima, 2013)。

このような巨大地震の後には, 余効変動の発生が広く知られており, 2011 年東北地方太平洋沖地震後も日本列島規模の余効変動の発生が報告されている (Nishimura et al., 2014)。具体的には, 水平方向には東向きの変動が発生し, 鉛直方向には太平洋沖の地域では隆起が報告されている。このような全体的な地殻変動は, 震源断層の地震後滑りと下部地殻及び上部マントルの粘弾性変形でモデル化できることが報告されている (Ozawa et al., 2012; Sun et al., 2014; Diao et al., 2014; Silverii et al., 2014; Yamagiwa et al., 2015)。

余効変動に関しても, 局所的な変動が発生していると考えられるが, これまでにあまり考察されていない。本稿では, 地震後から数年間にわたって発生している関東平野南部の局所的な地殻変動を GNSS と PS 干渉 SAR 解析を用いて検出し, 考えうる原因について考察を行う。

2. 地震前・地震時・地震後の関東平野の地表変動

地震前・地震時・地震後の関東平野の地表変動を国土地理院が運用している GNSS ネットワーク

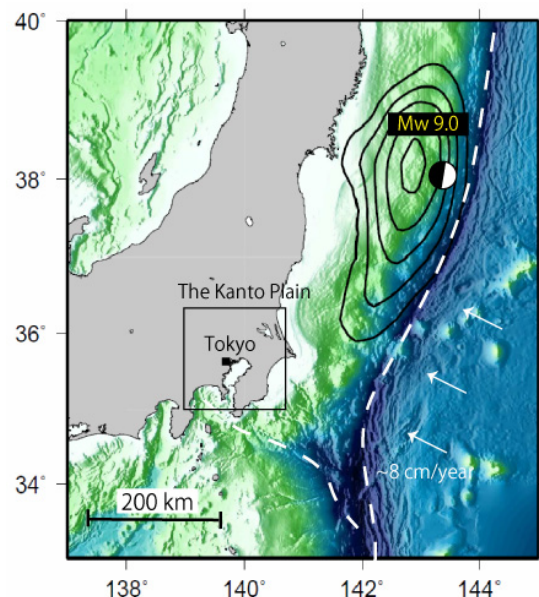


図 1 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域と関東平野の位置。

である GEONET データの F3 解 (Hatanaka et al., 2003) を用いてマッピングした。以下で示す地震前および地震後の年間地表変動量は, 毎月の座標から, 地表変動速度が一定であるとの仮定を設けて, 線形フィッティングを行い推定したものである。地震後については, ドイツの SAR 衛星である TerraSAR-X のデータを用いた PS 干渉 SAR 解析も併用し, 地表変動のマッピングを行った。PS 干渉 SAR 解析では, 時系列的に取得された複数の SAR データを用いて, 地表変動の時間変化を求める手法である (Ferretti et al., 2001; Crosetto et al., 2016)。

2.1 地震前・地震時の地表変動

図 2 は GNSS によって検出した 2011 年東北地方太平洋沖地震の本震前・本震時の鉛直地表変動量を表す。地震前は, 2005 年 1 月から 2010 年 12 月間に観測されたデータを用いた。地震時は, 2011 年 3 月 10 日と 3 月 12 日に取得されたデータを用いた。

地震前には, 関東平野の一部の地域 (北部や南

東部)で局所的な沈下が見られる(図2a)。この沈下は、地下水やガス汲み上げに伴うものと言われている。一方、地震時には関東平野全体が沈下し、沈下量は震源断層がある北東に向かって大きくなっていることが分かる(図2b)。

2.2 地震後の地表変動

図3a及び3bは、2011年4月から12月の毎月の座標から推定した水平方向及び鉛直方向の地殻変動である。水平方向には全体的に東向きに変動しており、変動量は震源断層に近い東部ほど大きい。一方で、鉛直方向の地表変動はより複雑な傾向を示すことが分かった。上述のように、全体的には隆起が発生しており、隆起量は東部ほど大きい。これは、地震時の変動と逆向きであり、震源断層の地震後滑りと下部地殻及び上部マントルの粘弾性変形で説明されている(Ozawa et al., 2012; Sun et al., 2014; Diao et al., 2014; Silverii et al., 2014; Hu et al., 2014; Yamagiwa et al., 2015)。しかしながら、この既存のモデルでは説明できないと思われる、局所的に隆起域の大きい地域が関東平野南部において存在していることが分かった(図3bの破線部)。局所的な隆起域は、北西-南東方向の約30km×50kmの楕円状の地域で発生しており、周囲より年間数cmほど隆起速度が大きい。図3cおよび3dは、2012年及び2013年における鉛直地表変動速度であるが、これらの期間においても局所的な隆起は確認された。しかしながら、局所的な隆起量は時間が経つにつれて小さくなり、周囲の隆起量とほぼ同程度になることが分かる。

この局所的な隆起と地震活動の比較を行うため、2011年東北地方太平洋沖地震後から2013年間に発生したマグニチュード3以上の地震をマッピングした。プレート境界では多数の地震活動が観測されているものの、局所的な隆起域が検出さ

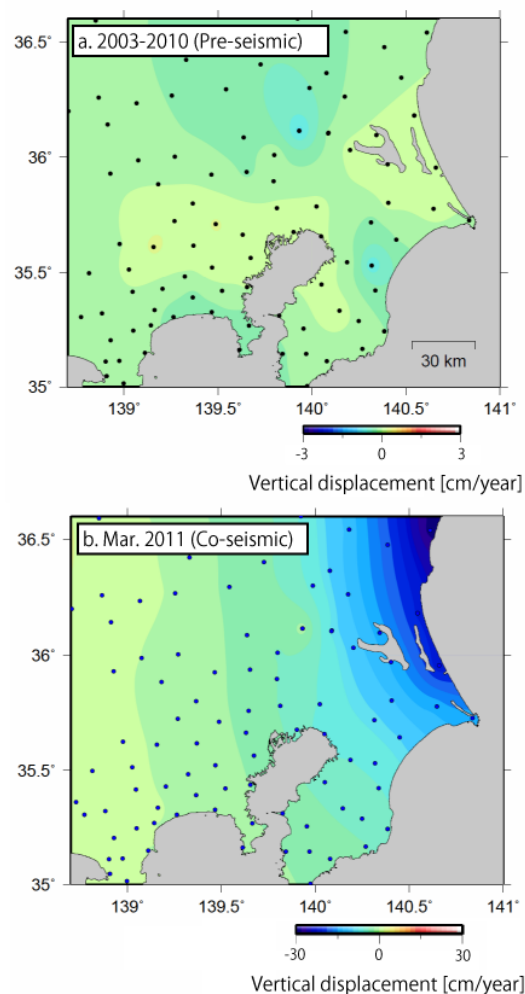


図2 GNSSによって得られた2011年東北地方太平洋沖地震前(2003-2010)の関東平野の年間鉛直地表変動量および地震時(2011年3月10日-2011年3月12日)の鉛直地表変動量

れた地域においては、地震活動がほとんど無いことが分かった。この局所的な隆起は非地震性の地表変動であると言える。

さらに詳細な地表変動の空間分布を得るため、2011年4月から2012年10月間に取得されたTerraSAR-Xデータ33シーンを用いて、PS干渉SAR解析を行った。利用可能なデータを調べたところ、局所的な隆起域の東部のみをカバーするデータを入手可能であったため、そのデータのみを用いた。また、PS干渉SAR解析では、解析時に

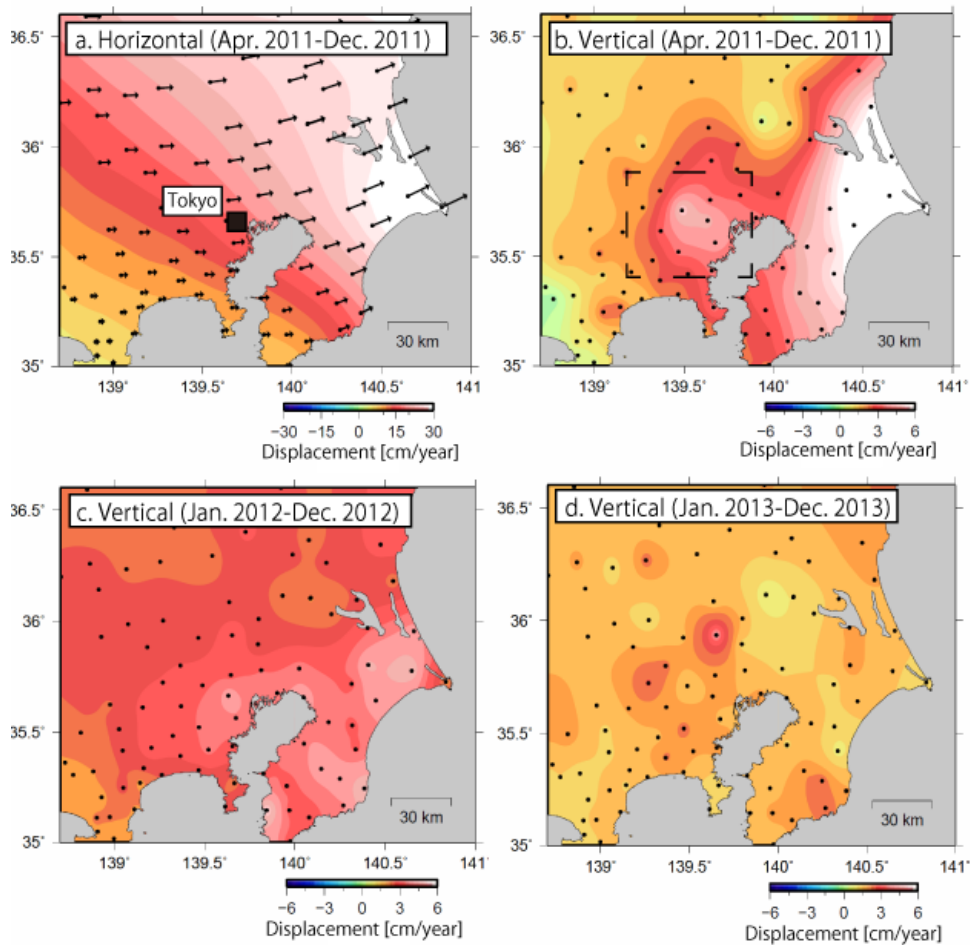


図3 GNSSによって得られた2011年東北地方太平洋沖地震後の関東平野の年間地表変動量。(a) 2011年4月–2011年12月(水平方向), (b) 2011年4月–2011年12月(鉛直方向), (c) 2012年1月–2012年12月(鉛直方向), (d) 2013年1月–2013年12月(鉛直方向)。基準点は設けずに2期間の間の年間変動量を線形フィッティングにより推定した。

基準点を設定する必要があるが、解析範囲内で最も隆起速度の小さかったGNSS観測点を基準点(変動ゼロ)とし、解析を行った(図4のRef)。

図4にPS干渉SAR解析の結果を示す。GNSSで局所的に隆起量が大きいと分かった地域において、同様の隆起量が見られた。しかしながら、複雑な地表変動の空間分布をしていることが分かった。これは、地表変動の原因が比較的浅い(数十mから数km程度)ところにあることを示唆している。

3. 局所的な地表隆起のメカニズムの考察

地震後の地表変動について、これまでに以下の3つのメカニズムが提案されている:(1)地震断層の地震後滑り,(2)上部マントル及び下部地殻の粘弾性変形,(3)地下流体の移動に伴う変動である(例えば, Ozawa et al., 2012; Sun et al., 2014; Diao et al., 2014; Silverii et al., 2014; Hu et al., 2014; Yamagiwa et al., 2015)。これらの可能性の中で、震源断層の地震後滑りの影響は少ないと考えられる。その理由は、関東平野下において、太平洋プレー

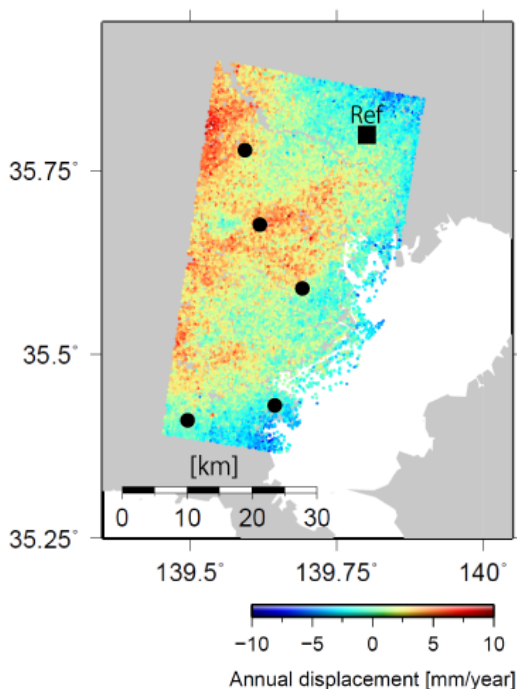


図4 PS干渉SAR解析によって得られた関東平野南部の地表変動量。黒四角および黒丸は用いたTerraSAR-Xデータ内に含まれるGNSS観測点を表し、黒四角はPS干渉SAR解析において基準点としたGNSS観測点を表す。

トの上面の深さは50–100 km程度ということが推定されており、地震後滑りが発生した場合、より広域の変動が発生すると考えられるためである。加えて、本研究で推定された局所的な隆起域には、活断層は見つかっておらず、震源断層以外の影響も考えにくい。また、関東平野直下に不均質な粘弾性構造も報告されておらず、粘弾性変形の影響も小さいと考えられる。空間的に不均質な粘弾性構造が地表変動に影響を与えることは知られているが (Pollitz et al., 2003; Yamasaki and Houseman, 2012), もし仮に地下に不均質な粘弾性構造があったとしても60 km以深であるため (Pollitz et al., 2008), より広域の地表変動 (50 km以上) に表れると考えられる。したがって、震源断層の地震後滑りや粘弾性変形では、本研究で推定された局所的な地表変動は説明することができない。

一方で、地下流体の移動に伴う地表変動は最も

可能性があるメカニズムである。例えば、石原ほか (2012) では、本震後1カ月において、東京周辺での地下水位の上昇を報告している。また、東京都や神奈川県が公表している月ごとの地下水位から年平均水位変動を推定し、マッピングしたところ、特に地震後1年間において年間約5 mほど地下水位が上昇していることが分かった (図5)。さらに、地下水位が上昇した位置は、局所的な隆起が観測された位置と整合的である。

地震に伴う地下水位の変化は2つのメカニズムで説明されている。1つは断層活動に伴う地殻の静的な応力変化である (例えば, Johnston et al., 1995; Jonsson et al., 2003)。これは、特に震源断層周辺で発生することが報告されている。しかしながら、関東平野は約400 kmも震源から離れており、顕著な地殻応力変化は考えづらい。一方で、震源より離れた地域では、浸透率の変化に伴い、地下水位が変化することが知られている (Manga et al., 2003; Manga et al., 2012)。地震波によって、地殻のクラック等の内部の粘土鉱物等の粒子が移動し、浸透率が増加することが知られている。実際、関東平野での浸透率の変化は、Nakata and Snieder (2012)でS波速度の変化により推定されている。さらに、関東平野の中でも、本研究で局所的な隆起が観測された場所の地下では、2000 mから3000 mもの厚い堆積層の存在が知られており、この厚い堆積層が1–30秒もの長周期の地震波を増幅させたことが報告されている (Furumura, 2014)。地震波による浸透率の変化は特に長周期の波で顕著であることが知られており (Manga et al., 2012), このような特徴的な地下構造が今回の局所的な隆起を引き起こした可能性がある。

また、本研究で注目した関東平野南部の地域以外にも、複数の地域で局所的な隆起が発生していた可能性がある。例えば、ElGharbawi and Tamura

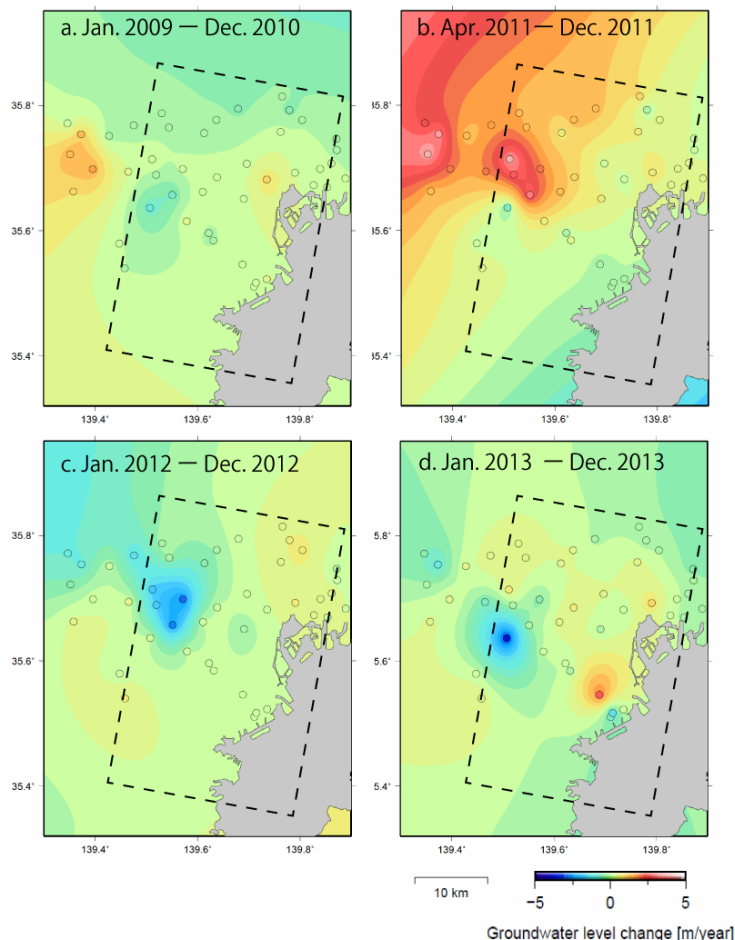


図5 2011 東北地方太平洋沖地震前後の関東平野南部の年間地下水位変化. 黒丸は地下水位データを用いた観測点の位置を表し、黒破線はPS 干渉 SAR 解析を行った SAR データの範囲 (図4) を表す.

(2015)では、ENVISAT/ASARデータを用い、関東平野南東部において、2011年5月から2011年6月間に20–40 mmもの局所的な隆起が発生していたことを報告している.

4. まとめ

本研究では、GNSSデータを用いて2011年東北地方太平洋沖地震後の関東平野南部の約30×50 km²の地域で発生している局所的な隆起を検出した. さらに、2011年4月から2012年11月に取得されたTerraSAR-Xデータを用いたPS干渉SAR解析を適用したところ、局所的な隆起域は不均質

な空間分布を有していることが分かった. このような局所的な隆起は、これまでに提案されている本地震に伴う地表変動では説明することができない. 地震前後の地下水位の変化と比べたところ、局所的な隆起が発生した地域では地下水位の上昇が発生しており、地下水位上昇に伴い地表の隆起が発生した可能性がある. また、このような地下水位上昇は地殻の浸透率変化と関係している可能性がある. 地震後の浸透率の変化に伴う地下水位変化はこれまでに報告されているものの、地表の隆起は報告されておらず、本研究が初めての事例である可能性がある.

謝辞

GNSS データは、国土地理院が運用している GEONET データの F3 解を使用しました。また、TerraSAR-X データは、TerraSAR-X scientific service system (Proposal No. GEO2696) より提供頂きました。また、地下水位データは東京都および神奈川県が公表している地下水位データを使用しました。ここに記して感謝いたします。

文献

- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-Gonzalez, M., Devanthery, M. and Crippa, B. (2016): Persistent scatterer interferometry : A review, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78-89.
- Diao, F., Xiong, X., Wang, R., Zheng, Y., Walter, T., Weng, R. and Li, J. (2014): Overlapping post-seismic displacement processes: afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Mw 9.0 Tohoku (Japan) earthquake, *Geophys. J. Int.*, 196(1), 218-229.
- ElGharbawi, T. and Tamura, M. (2015): Coseismic and postseismic displacement estimation of the 2011 Tohoku earthquake in the Kanto region, Japan, using InSAR time series analysis and GPS, *Remote Sensing of Environment*, 168, 374-387.
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2001): Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE Geosci. Remote Sens.* 39, 8–20.
- Furumura, T. (2001): Risk of long-period ground motion due to the deep basement structure of the Kanto Plain, *Journal of Geography*, 123(4), 434-450.
- Hatanaka, Y., Iizuka, T., Sawada, M., Yamagiwa, A., Kikuta, Y., J. M. Johnson, and C. Rocken (2003): Improvement of the analysis strategy of GEONET, *Bull. GSI*, 49, 11-37.
- Hu, Y., Burgmann, R., Freymuller, J. T., Banerjee, P. and Wang K. (2014): Contributions of poroelastic rebound and a weak volcanic arc to the postseismic deformation of the 2011 Tohoku earthquake, *Earth, Planets and Space*, 66.
- Ishihara, S., Kawamura, A., Amaguchi, H., Takasaki, T., Kawai, M. (2012): Characteristics of unconfined and confined groundwater level fluctuation in Tokyo by the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake, *JSCE Journal*, 68(4), I_595-I_600.
- Johnston, M. J. S., Hill, D. P., Linde, A. T., Langbein, J. and Bilham, R. (1995): Transient displacement during triggered seismicity from the June 1992 Mw=7.3 Landers earthquake at Long valley volcanic caldera, California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(3), 787-795.
- Jonsson, S., Segall, P., Pedersen, R. and Bjornsson, G. (2003): Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients, *Nature*, 424, 179-183.
- Manga, M., Brodsky, E. E. and Boone, M. (2003): Response of stream flow to multiple earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 30(5), 1214.
- Manga, M., Beresney, I., Brodsky, E. E., Elkhoury, J. E., Elsworth, D., Ingebritsen, S. E., Mays, D. C. and Wang, C.-Y. (2012): Change in permeability caused by transient stresses: field observations, experiments, and mechanisms, *Rev. Geophys.*, 50, RG2004.
- Nakata, N. and Snider, R. (2012): Time-lapse change in anisotropy in Japan's near surface caused by the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*

- Nishimura, T. (2014): Pre-, co-, and post-seismic displacement of the 2011 Tohoku-oki earthquake and its implication to a paradox in short-term and long-term displacement, *Journal of Disaster Research*, 9(3).
- Nishimura, T., Suito, H., Kobayashi, T., Dong, Q. and Shibayama, T. (2016): Excess strain in the Echigo Plain sedimentary basin, NE Japan: Evidence from coseismic displacement of the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. J. Int.*, 205(3), 1613-1617.
- Ozawa, S., Nishimura, T., Suito, H., Kobayashi, T., Tobita, M., Imakiire, T. (2011): Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, *Nature*.
- Ozawa, S., Nishimura, T., Munekane, H., Suito, H., Kobayashi, T., Tobita, M. and Imakiire, T. (2012): Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan, *J. Geophys. Res.*, 117, B07404.
- Pollitz, F. F. (2003): Post-seismic relaxation theory on a laterally heterogeneous viscoelastic model, *Geophys. J. Int.*, 155, 57-78.
- Pollitz, F., Banerjee, P., Grijalva, K., Nagarajan, B. and Burgmann R. (2008): Effect of 3-D viscoelastic structure on post-seismic relaxation from the 2004 M=9.2 Sumatra earthquake, *Geophys. J. Int.*, 173, 189-204.
- Silverri, F., Cheloni, D., D'Agostino, N., Selvaggi, G. and Boschi, E. (2014): Post-seismic slip of the 2011 Tohoku-Oki earthquake from GPS observations: implications for depth-dependent properties of subduction megathrusts, *Geophys. J. Int.*, 198, 580-596.
- Sun, T., K. Wang, T. Iinuma, R. Hino, J. He, H. Fujimoto, M. Kido, Y. Osada, S. Miura, Y. Ohta, and Y. Hu (2014): Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Nature*, 514, 84-87.
- Takada, Y. and Y. Fukushima (2013): Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan, *Nature*, 6, 637-641.
- Yamasaki, T. and Housemann, G. A. (2012): The crustal viscosity gradient measured from post-seismic displacement: A case study of the 1997 Manyi (Tibet) earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, 351-352, 105-114.
- Yamagiwa, S., Miyazaki, S., Hirahara, K. and Fukahata, Y. (2015): Afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0) inferred from inland GPS and seafloor GPS/Acoustic data, *Geophys. Res. Lett.*, 42(1), 66-73.