

12-4 東北地方太平洋沖地震の発生前から現在に至る地殻変動の推移 ：陸上地殻変動

Crustal deformation prior to and following the 2011 Tohoku-oki earthquake inferred from geodetic observation on land

黒石 裕樹・宗包 浩志・畑中 雄樹・藤原 智 (国土地理院)

Yuki Kuroishi, Hiroshi Munekane, Yuki Hatanaka, Satoshi Fujiwara
(Geospatial Information Authority of Japan)

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震（以下、「本震」という。）の発生から約 10 年が経過した。巨大な地震のサイクルに関して議論するにあたり、陸域の測地観測で捉えられた東北日本の地殻変動について、地震発生前から現在までの推移を振り返り、観測された地殻変動を理解するために提示された、プレート境界における推定すべり等のモデルについて整理する。

2. 東北地方太平洋沖地震の発生前、地震時、地震後の陸域地殻変動と推定されたすべり等

本震の発生前において、東北日本の水平変動では、日本海溝沿いでの太平洋プレートとの固着に伴う東西短縮場であり、特に宮城県北部は 19 世紀末以来継続して強い固着が支配的な状況であったと考えられる¹⁾。上下変動では、大局的には太平洋側で沈降し、日本海側で隆起する傾向があり、岩手県や宮城県の太平洋側の沈降速度は 19 世紀末以降大きな変化は見られず、最も沈降量の大きな宮城県周辺において 5mm/yr 程度の沈降速度であった¹⁾。

GEONET による 1997 年 10 月からの 2 年間における地殻変動速度の水平成分では、宮城県北部から茨城県北部にかけてと北海道の襟裳岬周辺で西向きの変動が顕著であった¹⁾。そのデータを用いた、プレート境界のすべり欠損モデルに基づくインバージョン解析から、宮城県沖と十勝沖での強い固着、福島県沖から茨城県沖にかけて部分的固着、及び、岩手県北部から青森県の海岸線直下付近での 1994 年三陸はるか沖地震の余効すべりが推定された¹⁾。一方、2008 年 10 月からの 2 年間における地殻変動速度では、宮城県中部から岩手県にかけて西向きの変動が目立つが、福島県では西向きの変動はほとんど見られず、北海道西部では東向きの変動が見られた¹⁾。そのデータを用いたインバージョン解析から、襟裳岬南東沖から十勝地方直下にかけて 2003 年十勝沖地震の余効すべり、岩手県北部の沖合が固着に転じたことが推定された¹⁾。また、GEONET の時系列データと併せ、本震発生の 10 年程度前から、震源域の一部（福島県沖）で固着の剥がれの進行を示唆する分析結果が示された¹⁾。

2003 年から本震発生前までの期間において日本海溝沿いのプレート境界で発生したマグニチュード (M) 7 前後の地震（2003 年 10 月福島県沖、2005 年 8 月宮城県沖、2008 年 5 月茨城県沖、2008 年 7 月福島県沖、2010 年 3 月福島県沖）では、GEONET により余効変動が観測された²⁾。インバージョン解析から、これら 5 つの地震を合わせると、地震時の約 2.5 倍に相当するモーメントとなる余効すべりが推定され、日本海溝沿いの固着域の南部における固着を低減し、本震の震源近傍の応力状態を変化させたように見える²⁾。

本震に伴い、GEONET によって北海道から九州北部に至る広範囲にわたって地殻変動が観測され、牡鹿半島において 5m 超の水平変位と 1m 超の沈降が最も大きな変動であった。海底地殻変動観測と合わせたインバージョン解析から、震源の近くで最大約 60 m、海溝軸の近くでも約 48 m という地震時すべりが推定された²⁾。

本震 (①) 後 30 分以内に岩手県沖 (②) と茨城県沖 (③) で M7 超の地震が発生した。GEONET データの精密単独測位解析結果に経験的直交関数解析を適用した時系列から抽出した、①、②、③の地震時地殻変動と余効変動 (①から②発生前の 10 分間、③以後の 4 時間) のそれぞれについて推定したすべり域は、互いに相補的であり、順次隣接域に進展する傾向を示した³⁾。

本震直後から広範囲において大きな余効変動が見られている。GEONET 観測による地震後 5 年間の累積では、水平成分が地震時変動に類似した空間分布を持ち、最大約 120cm、上下成分は地震時変動とは異なる空間分布を持ち、約 50cm の隆起と約 10cm の沈降であった。マクスウェル線形粘弾性媒質のマントルを仮定して余効変動観測結果への粘性緩和モデル推定を行うと、プレート下面の低粘性層の存在と粘性率の深さ依存性等の不均質粘性構造が重要であり、本震後の短期変動においても粘性緩和が有意な寄与を有し、余効変動のモデル化には粘性緩和と余効すべりの考慮が必要なこと⁴⁾、また、粘性緩和だけでも少なくとも数十年は余効変動が継続することが分かった⁵⁾。

3. 余効変動の関数フィッティングによる数値予測実験

GEONET による余効変動の全点の観測時系列 (東西, 南北, 上下の各成分) に適合する、時定数の異なる二つの対数関数と一つの指数関数を共有する時間関数を用いる予測式⁶⁾について、2020 年 12 月までの観測データに適用した。その結果、本震後 3.9 年間で適合期間とする予測パラメータ推定が安定かつ良好であること、それによる数値予測からの観測時系列の残差は 2015 年以降乖離を示し、それまでとは異なる現象の発現を示唆することが分かった⁷⁾。そこで、2015 年から 2020 年までの残差データに適合する予測式を用いて 2025 年末迄の上下変動曲線をいくつかの代表点について求めると、2025 年末時点においても地震前のレベルには戻らない結果を示した⁷⁾。

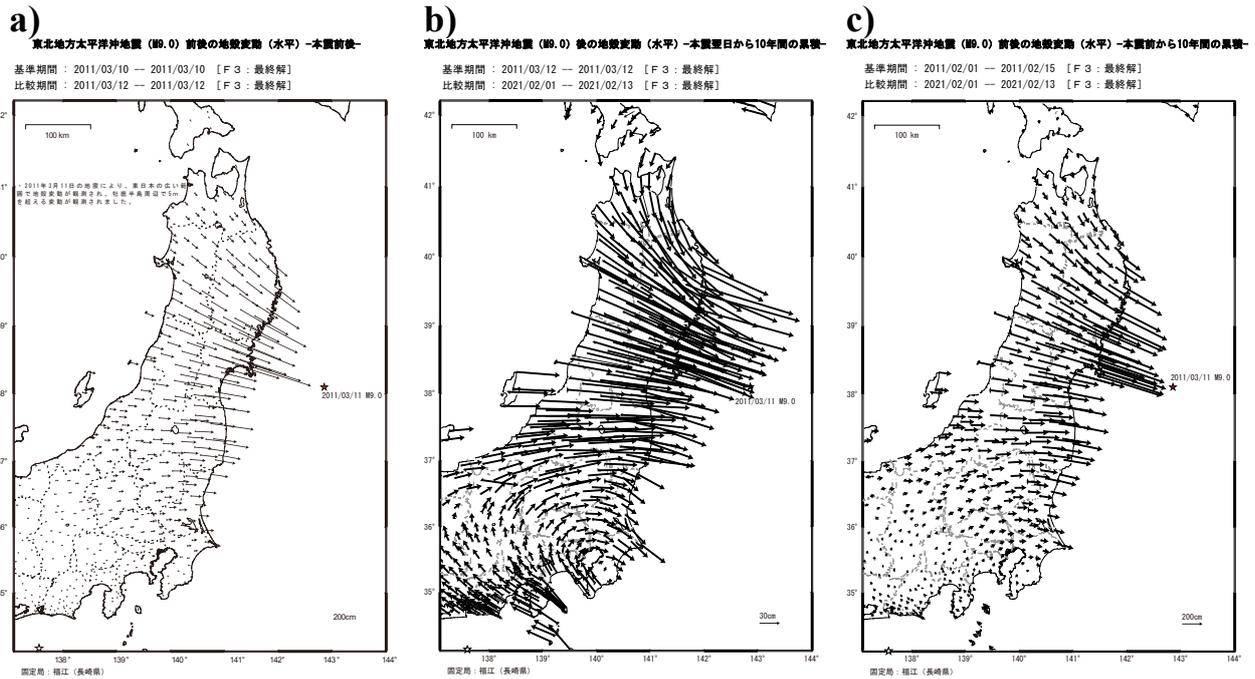
4. 観測された地殻変動の収支

GEONET によって観測された、本震の地震時、本震後約 10 年間の累積余効変動、及び本震前 (2011 年 2 月) からの 10 年間の累積の地殻変動について、水平成分を図 1 に、上下成分を図 2 に示す。本震前から本震約 10 年後までの収支としては、牡鹿半島周辺において最大となっており、水平成分は 6m 超、上下成分は約 50cm の沈降である。なお、図 1(b)-(c)と図 2 (b)-(c)の比較期間について、会議時点の資料の設定 (2020 年 12 月 17 日~12 月 31 日) から 2021 年 2 月 1 日~2 月 13 日に更新した。

東北地方太平洋沖地震型の超巨大地震の平均発生間隔は 550~600 年程度とされ⁸⁾、その地震サイクルにおいては、東北地方太平洋沿岸において地震間の上下変動速度は必ずしも一様ではなく、観測された沈降は地震間の後半だけに生じるというモデルも提案されている⁹⁾。現時点までの測地観測は地震サイクルの一部段階を捉えているが、例えば上下変動の収支はサイクル全体でみる必要がある。地殻変動推移の詳細な把握は超巨大地震の進展理解に重要であり、今後も継続すると考えられる余効変動などの地殻変動を注意深く監視していくことが重要であると考えられる。

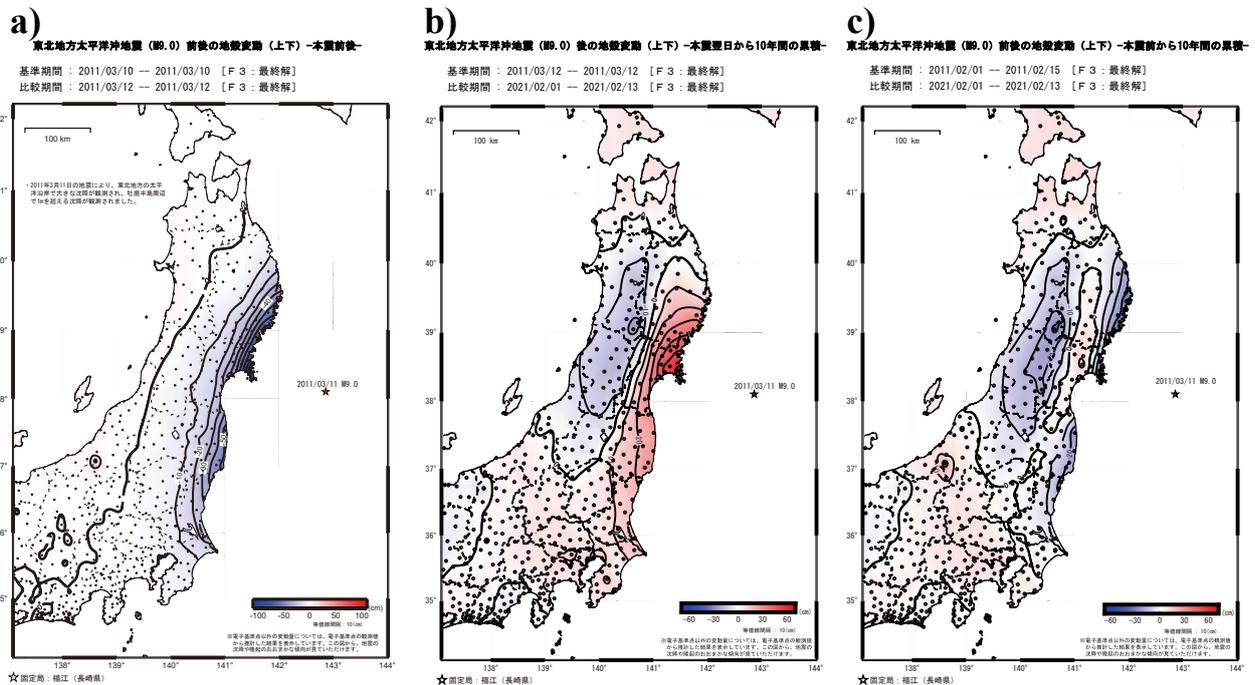
参考文献

- 1) 西村卓也 (2012), 測地観測データに基づく東北日本の最近 120 年間の地殻変動, *地質学雑誌*, **118**, 278-293.
- 2) Ozawa, S., et al. (2012), Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku Earthquake, Japan, *J. Geophys. Res.*, **117**, B07404, doi:10.1029/2011JB009120.
- 3) Munekane, H. (2012), Coseismic and early postseismic slips associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake sequence: EOF analysis of GPS kinematic time series, *Earth, Planets and Space*, **64**, 160, doi:10.5047/eps.2012.07.009.
- 4) Suito, H. (2017), Importance of rheological heterogeneity for interpreting viscoelastic relaxation caused by the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth, Planets and Space*, **69**, 21, doi:10.1186/s40623-017-0611-9.
- 5) Suito, H. (2018), Current status of postseismic deformation following the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *J. Disaster Res.*, **13**, No.3, 503-510.
- 6) Tobita, M. (2016), Combined logarithmic and exponential function model for fitting postseismic GNSS time series after 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth, Planets and Space*, **68**, 41, doi:10.1186/s40623-016-0422-4.
- 7) 藤原智・他 (2020), 東北地方太平洋沖地震の余効変動予測の検証 2020, 日本測地学会第 134 回講演会要旨集, 113-114, 日本測地学会.
- 8) 地震調査委員会 (2019), 日本海溝沿いの地震活動の長期評価, pp.144, 地震調査研究推進本部
- 9) Nishimura, T. (2014), Pre-, co- and post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake and its application to a paradox in short-term and long-term deformation, *J. Disaster Res.*, **9**, No.3, 294-302.



第 1 図 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動(水平)。(a)地震時、(b)地震後約 10 年間の累積、(c)本震前 (2011 年 2 月) から 10 年間の累積。

Fig. 1 Horizontal crustal displacement associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake relative to Fukue site. (a) coseismic, (b) postseismic for about 10 years after the earthquake, (c) cumulative for 10 years since February, 2011.



第 2 図 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動(上下)。(a)地震時、(b)地震後約 10 年間の累積、(c)本震前 (2011 年 2 月) から 10 年間の累積。

Fig. 2 Vertical crustal displacement associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake relative to Fukue site. (a) coseismic, (b) postseismic for about 10 years after the earthquake, (c) cumulative for 10 years since February, 2011.