12-5 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う海底地殻変動観測とその成果の活用 Seafloor geodetic observations associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake and their applications

富田 史章(海洋研究開発機構)

TOMITA Fmiaki (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

2011年東北地方太平洋沖地震(以下、東北沖地震)の発生に伴って、本震発生前・発生時・発生 後の地殻変動が陸域のみならず海域でも観測されている.特に,震源域間近の海底で捉えた地殻変 動は,東北沖地震がどのような地震であったのか、どのような余効変動が生じているのか、また、 今後どのように余効変動が発展していくかを考える上で非常に有用である.本稿では,東北沖地震 に伴う一連の海底地殻変動観測成果を総括し,その成果が地震サイクルのモデル化にどのように貢 献しているかを報告する.

東北沖地震発生前の GNSS 音響観測(GNSS-A 観測)による海底地殻変動場は第1図 a のように なっており、東北大学の所有する GFK 点^{1,2)}以外は海上保安庁による観測成果³⁾である. どの観測 点も陸向きの変動を示しており、特に 2005 年頃以前の宮城沖での陸向きの変動が大きく、プレート 間固着の影響が大きいことが伺える.一方で、それ以降は宮城沖・福島沖で陸向きの変動が比較的 小さくなっており、2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震の長期的な余効変動の可能性や、長期的な ゆっくりすべり現象(あるいは、固着の剥がれ)⁴⁾の影響が含まれている可能性がある.こうした海 底地殻変動観測の成果を踏まえた本震前の固着分布の推定結果は、海溝付近の空間解像度自体は低 いものの、宮城沖を中心とした海溝近傍での強い固着を示した⁵⁾.

東北沖地震の地震時地殻変動^{6,7}は第1図bのようになっている. 宮城沖の海溝近傍ほど顕著な地 殻変動を示し,海底地殻変動観測データを踏まえた地震時すべりの推定結果は,50mを超えるすべ りが宮城沖の海溝軸まで達していることを示した⁸⁾.しかし,海底測地観測点が宮城沖に集中して いたため,空間解像度の劣化により震源域の海溝に沿った南北の広がりの詳細な議論は困難になっ ている.

東北沖地震発生後の GNSS-A 観測による海底地殻変動場は第1図 c-d のようになっている⁹⁻¹¹. 地震発生からの1年間において,宮城沖の GJT3 観測点は 30 cm 程度の陸向きの変動を示し,福島 沖の FUKU 観測点は 30 cm 程度の海溝向きの変動を示した(図1c).これらは,それぞれ地震直後 の顕著な粘弾性緩和と余効すべりの影響を示すと考えられる.2012年以降は,観測点が大幅に増強 され¹²,震源域の宮城沖は陸向きの変動,震源域南側の福島・茨城沖は海溝向きの変動,三陸沖は 震源域北側の三陸沖は変動自体が小さいという空間的な余効変動の違いが明らかになった(第1図 d).震源域での西向きの変動は,地震後1年間と比較して 2012年以降は小さくなっていることか ら、地震後1年間の時間減衰が大きいと考えられる.一方で,2012年から 2016年の変位速度とそ れ以降の差が小さいことから,2012年以降の時間減衰は小さいと考えられる.これは異なる時定数 の粘弾性応答が混在していることを示している.福島沖・茨城沖での東向き挙動は時間減衰が大き く,現在では海溝向きの傾向が見られなくなりつつあり,余効すべりが収束傾向にあることを示し ている.また,震源域北側では,東北沖地震に伴う顕著な余効変動が見られない一方で,2015年2 月に発生した三陸沖でのスロースリップイベントの影響が見られている¹¹⁾.

上記の海域での余効変動(特に初期の余効変動)の観測成果は、有限要素法を用いた粘弾性応答 のモデル化を通して、過渡的なクリープを考慮した地下のレオロジー(Burgers レオロジー^{10,13)}や power-law クリープ¹⁴⁾)、及び、Cold nose 構造¹⁰⁾や海洋プレート下の低粘性層¹⁰⁾等の複雑な粘弾性 構造が、余効変動に寄与していることを示した。また、こうした粘弾性応答を差し引いた余効すべ りのモデル化により、大きな余効すべりが岩手沖沿岸部と福島沖の海溝近傍で発生していたことが 明らかになってきている^{13,15)}.また、海域での地震後の海底地殻変動観測は、本震時の大すべり域 の拘束にも有用であることが示されてきている¹⁶⁾.地震後の地殻変動は、粘弾性緩和を介して、地 震時すべりの分布に関する情報を含んでいる。そのため、粘弾性グリーン関数を用いて地震時・地 震後の地殻変動観測データから地震時すべり・余効すべりを同時推定(粘弾性インバージョン)す ることで、地震後の地殻変動から地震時すべり・余効すべりを同時推定(粘弾性インバージョン)す ることで、地震後の地殻変動から地震時すべり域の拘束が可能となる。二層の粘弾性構造^{17,18)}を仮 定した粘弾性インバージョンの結果は、地震後の2012年以降に拡張された海底地殻変動観測網に おける観測データが地震時すべり推定における空間解像度を向上させ、本震時の大すべり(ここで は、すべり量が20m以上とした)の発生域の北限が 39.2°N、南限が 37°N 程度であることを示した (第 2 図)¹⁶⁾.

今後,東北沖における GNSS-A 観測は継続的に行われていく見込みである. なお,2015 年 2 月に 発生した三陸沖でのスロースリップイベントの再来や,1968 年十勝沖地震及び 1994 年三陸はるか 沖地震の震源域における次なる大地震発生の懸念から,それらの発生領域近傍に観測点を増設(合 計2観測点)するなど東北沖地震の震源域の北側で観測を強化している. また,現状の GNSS-A 観 測は,船舶を用いたキャンペーン観測が主流であるが,近年ウェーブグライダーによる無人観測に 成功しており¹⁹,今後はその活用による観測の効率化も期待される.一方,現状の GNSS-A 観測成 果では水平変動場の把握が進んでいるが,余効変動モデルの更なる高度化には海域での広域の上下 変動場の把握も重要であり,その推定も今後進められる見込みである. こうした観測の高度化に加 え,粘弾性インバージョンについてより現実的な粘弾性構造を反映させる等のモデルの高度化につ いても進める見込みである.

(富田 史章)

謝辞

本資料の作成に当たり,海上保安庁海洋情報部で提供されている最新の GNSS 音響観測成果 ⁹を 活用させていただきました.

参考文献

- 1) Mizukami et al. (2007), 日本地球惑星科学連合 2007 年大会予稿集, J169-015.
- 2) Sato et al. (2008), *測地学会誌*, **54**, 3, 113-125.
- 3) Sato et al. (2013), Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118, 7, 3860–3869.
- 4) Yokota & Koketsu (2015), *Nature Communications*, 6, 5934.
- 5) Iinuma et al. (2015), International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH): International Association of Geodesy Symposia, **145**, 11–19.

- 6) Sato et al. (2011), *Science*, 332(6036), 1395.
- 7) Kido et al. (2011), Geophysical Research Letters, 38, L24303.
- 8) Iinuma et al. (2012), Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 117, B07409.
- 9) Yokota et al. (2018), *Scientific Data*, **5**, 180182.
- 10) Sun et al. (2014), Nature, 514, 84-87.
- 11) Honsho et al. (2019), Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124, 5990-6009.
- 12) Kido et al. (2015), International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH): International Association of Geodesy Symposia, 145, 3-10.
- 13) Freed et al. (2017), Earth and Planetary Science Letters, 459, 279–290.
- 14) Agata et al. (2019), Nature Communications, 10:1385.
- 15) Iinuma et al. (2016), Nature Communications, 7:13506.
- 16) Tomita et al. (2020), Earth, Planets and Space, 72:84.
- 17) Fukahata & Matsu'ura (2005), Geophysical Journal International, 161, 2, 507-521.
- 18) Fukahata & Matsu'ura (2006), Geophysical Journal International, 166, 1, 418-434.
- 19) Iinuma et al. (in press), Frontiers in Earth Science, doi: 10.3389/feart.2021.600946.



第1図 2011 年東北沖地震前(a)・地震時(b)・地震後1年間(c)・2012 年以降(d)の GNSS-A 観測成果. 地震時については GEONET 観測点における変位も示している.

Fig. 1 GNSS-A observational results (a) prior to, (b) during, (c) first 1 year after the 2011 Tohoku-oki earthquake, and (d) after 2012.



- 第2図 2011年東北沖地震の地震時すべり分布 (a) 地震時測地データによる弾性インバージョン結果 (b) 地震時・ 地震後(2012年9月~2016年9月)測地データによる粘弾性インバージョン結果(Tomita et al. [2020]より作 成). 灰色領域は、低解像度(解像度<0.05) 域を示す. (a)のシンボルは地震時の測地観測点(黒丸:陸上 GNSS,黒四角:GNSS-A,白抜き四角:OBP)を示し、(b)のシンボルは地震後の測地観測点を示す(黒丸: 陸上 GNSS,黒四角:GNSS-A).
- Fig. 2 Coseismic slip distribution of the 2011 Tohoku-oki earthquake (modified from Tomita et al. [2020]): (a) elastic inversion results using the coseismic geodetic data, and (b) viscoelastic inversion result using the coseismic and postseismic (from Sep. 2012 to Sep. 2016) geodetic data. Gray patches show low spatial resolution (resolution < 0.05) area. Symbols in (a) and (b) show the coseismic geodetic observational sites (black circle: onshore GNSS, black square: GNSS-A, open square: OBP) and the postseismic geodetic observational sites (black circle: onshore GNSS, black square: GNSS-A).