

12 - 2 近年の地震観測により得られた東北日本の応力場の空間不均質性と、
その偏差応力・断層強度状態・地震発生機構への示唆
**Spatial variations in stress field in NE Japan and its implication for the stress
magnitude, fault strength and the earthquake occurrence mechanism**

吉田圭佑 (東北大学)

Keisuke Yoshida (Tohoku University)

1. はじめに

2011年東北沖地震の発生以降、東北日本の太平洋沖・内陸域において、それまで殆ど見られなかった向きの断層運動の地震活動が生じるようになった。直後の解析により、それらの地震活動を生じさせた応力場の方向が、2011年東北沖地震の断層運動により作られた応力場のそれと非常に良い一致を示すことが分かった。このことから、最初に、東北日本太平洋沖・内陸域の背景応力場が東北沖地震により大きく回転させられた可能性が指摘された (Hasegawa et al., 2011, 2012; Yoshida et al., 2012)。このことは東北沖地震前後の東北日本の偏差応力が非常に小さい(内陸域で差応力が1 MPa程度以下)ことを示唆し、そのことは地震発生機構の理解のための極めて重要な手掛かりとなる。本稿では、この後、東北沖地震前後の東北日本内陸の応力状態・地震活動についてより詳細に調べた結果得られた知見についてまとめる。

2. 東北日本の応力場の空間不均質

2.1. 2011年東北沖地震以前の東北日本の応力状態の空間不均質

2011年東北沖地震以前の応力状態は、一様に近い東西圧縮逆断層場として知られていた。しかしながら、近年の地震観測データにより得られた多数の震源メカニズムを用いた解析によると、東北沖地震以前から、応力場の方向に顕著な空間変化が存在していたことが明らかになった。東北日本前弧域の福島県東部～茨城や岩手県においては正断層場 (Imanishi et al., 2012) や南北圧縮場が分布するし、東北日本脊梁から背弧域にかけては最大圧縮方向としては東西方向が卓越するものの山間部下と平野部下とで中間・最小応力軸の方向が異なる。山間部下では中間主応力軸が鉛直を向く横ずれ断層場が卓越し、平野部下では最小主応力軸が鉛直を向く逆断層場が卓越する。それらの特徴は、第一義的には、上盤側プレートの曲げ変形による効果と、地形の存在による効果により説明することが可能であることが分かった (Yoshida et al., 2015a)。

2.2. 東北日本の大地震震源域周辺の応力状態の空間不均質

東北日本で発生した3つの大地震-2003年宮城県北部地震、2008年岩手宮城内陸地震、2011年福島県浜通りの地震-の震源域における応力状態を調べてみると、それらも顕著な空間変化を示すことが明らかになった (Yoshida et al., 2014, 2015b, 2016a)。そして、それらの空間変化のパターンは、それぞれの本震に伴う静的応力変化のそれと非常に良い一致を示すことが明らかになった。この一致は、震源域における応力場の空間変化が、それぞれの本震により生じさせられたことを示唆する。

3. 東北日本の応力場の空間不均質性の偏差応力・断層強度状態・地震発生機構への示唆

3.1. 東北日本の応力場の空間変化と東北日本の差応力

2で得られた応力場の空間変化のパターンが、それぞれ地形効果・本震による静的応力変化により良く説明することが可能であることは既に述べた。ただし、この際、東北日本の差応力が数十MPa程度以下であることが要請される。この値域は比較的シンプルな条件下で行ったモデル計算により得られたものであるが、より一般の場合でも結果は大きくは変わらないと予想される。背景応力場の偏差成分がこれよりずっと大きい場合に応力場の方向の空間変化を生じさせることは難しいように思われるためである。

数十MPa程度の差応力状態から計算される断層面上のせん断応力の値は、地震発生場に通常想定される岩石の摩擦強度に比べて極めて小さい。そのような場で地震が発生する原因の一つの可能性として、岩石の摩擦強度が通常想定されているものに比べて実際にはかなり小さいのかもしれない。プレート沈み込みに関係した地殻流体の移動に伴い間隙水圧が増加・断層強度が低下し、そのことが地震発生の鍵となっている可能性が考えられる。

3.2. 2011年東北沖地震による内陸の誘発地震活動の発生メカニズム

一方、2で推定された差応力の値～数十MPaは、2011年東北沖地震後の応力場の回転から推定された値(～1MPa)に比べて極めて大きい。その後の解析により、2011年東北沖地震時に応力場が回転したように見られた領域では、それ以前から小スケールの応力場の空間不均質が存在していたことが明らかになった。そのような不均質な応力場の中で、東北沖地震により局所的に応力が増加した領域において地震活動が活発になったことが、応力場の回転が生じたように見えていた原因であると考えられる(Yoshida et al., 2019a)。

2011年東北沖地震の余震の中には、地震時にせん断応力変化が減少したと考えられる断層面上で発生した群発地震活動も多数見られる。このことは、3.1で述べたような地殻流体による断層強度の低下が、実際の地震発生に寄与していることの傍証と見なすことができる(Terakawa et al., 2013; Yoshida et al., 2016b)。それらの群発地震活動は、注水実験による地震活動とよく似た特徴を幾つか持ち、例えば震源が時間とともに移動する(Okada et al., 2015; Yoshida & Hasegawa, 2018)。また、断層強度や応力降下量やb値、地震活動パターンが同期して時間変化する特徴や、破壊が深部に伝播するなどの特異な特徴を持ち、それらは深部から上昇してきた流体による間隙水圧の時間変化により統一的に理解できそうである(e.g., Yoshida et al., 2019b)。

3.3. 応力場の空間不均質が応力場の時空間変化の推定に与える影響

3.2で見いだされたような応力場の小スケールでの空間変化の存在は、地震の断層運動データを用いて応力場の時空間変化を推定する上で大きな障壁となる。例えばある地震前後で応力場が回転したように見えた場合であっても、それが実際には地震の発生場所の変化に起因する可能性を否定することは難しい。その上、そのような地震の発生場所の変化は、地震時応力変化による余震の選択的トリガリング効果を考えると、現実にも起こりそうである。応力場の時間変化を調べる際には、そのような応力場の空間変化が存在していないかの精査が極めて重要である。しかしながら、現実の地震の発生場所の偏りを考えると、地震データを用いた応力インバージョン法の原理(岩田・ほか, 2019)から、それ自体も非常に難しい。

4. おわりに

東北日本の応力場の方向は、2011年東北沖地震以前から顕著な空間変化をしていたことが明らかになった。そのような空間変化が2011年東北沖地震の静的応力変化と感応し、それまで地震活動が低調であった応力の異常域において以前卓越していたのと異なる向きの断層運動が生じるようになった。そのような応力場の小スケールでの空間変化の存在は、断層運動データを用いた応力インバージョン法により応力場の時空間変化を推定する大きな障壁となる。

一方で、応力場の顕著な空間変化は、プレート相対運動がリソスフェアに作る偏差応力の絶対値がそれほど大きくないことを示唆する。東北日本における応力場と地形効果・断層運動が作る応力変化との対応に基づく推定によると、東北日本の差応力の大きさが数十 MPa 程度であったことが要請される。そのような低差応力の下での地震発生は、地球内部の流体移動にコントロールされているのかもしれない。

[引用文献]

- Hasegawa, A., Yoshida, K., & Okada, T. (2011). Nearly complete stress drop in the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, planets and space*, 63(7), 35.
- Hasegawa, A., Yoshida, K., Asano, Y., Okada, T., Inuma, T., & Ito, Y. (2012). Change in stress field after the 2011 great Tohoku-Oki earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 355, 231-243.
- Imanishi, K., Ando, R., & Kuwahara, Y. (2012). Unusual shallow normal - faulting earthquake sequence in compressional northeast Japan activated after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. *Geophysical Research Letters*, 39(9).
- 岩田貴樹, 吉田圭佑, & 深畑幸俊. (2019). 地震学的データを用いた応力インバージョン. *地学雑誌*, 128(5), 797-811.
- Okada, T. O. M. O. M. I., Matsuzawa, T., Umino, N., Yoshida, K., Hasegawa, A., Takahashi, H., ... & Igarashi, T. (2015). Hypocenter migration and crustal seismic velocity distribution observed for the inland earthquake swarms induced by the 2011 Tohoku - Oki earthquake in NE Japan: implications for crustal fluid distribution and crustal permeability. *Geofluids*, 15(1-2), 293-309.
- Terakawa, T., Hashimoto, C., & Matsu'ura, M. (2013). Changes in seismic activity following the 2011 Tohoku-oki earthquake: effects of pore fluid pressure. *Earth and Planetary Science Letters*, 365, 17-24.
- Yoshida, K., Hasegawa, A., Okada, T., Inuma, T., Ito, Y., & Asano, Y. (2012). Stress before and after the 2011 great Tohoku - oki earthquake and induced earthquakes in inland areas of eastern Japan. *Geophysical Research Letters*, 39(3).
- Yoshida, K., Hasegawa, A., Okada, T., & Inuma, T. (2014). Changes in the stress field after the 2008 Mw 7.2 Iwate - Miyagi Nairiku earthquake in northeastern Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(12), 9016-9030.
- Yoshida, K., Hasegawa, A., & Okada, T. (2015a). Spatial variation of stress orientations in NE Japan revealed by dense seismic observations. *Tectonophysics*, 647, 63-72.
- Yoshida, K., Hasegawa, A., & Okada, T. (2015b). Spatially heterogeneous stress field in the source area of the 2011 Mw 6.6 Fukushima-Hamadori earthquake, NE Japan, probably caused by static stress change. *Geophysical Journal International*, 201(2), 1062-1071.
- Yoshida, K., Hasegawa, A., & Okada, T. (2016a). Heterogeneous stress field in the source area of the 2003

- M6. 4 Northern Miyagi Prefecture, NE Japan, earthquake. *Geophysical Journal International*, 206(1), 408-419.
- Yoshida, K., Hasegawa, A., & Yoshida, T. (2016b). Temporal variation of frictional strength in an earthquake swarm in NE Japan caused by fluid migration. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8), 5953-5965.
- Yoshida, K., & Hasegawa, A. (2018). Sendai-Okura earthquake swarm induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in the stress shadow of NE Japan: Detailed fault structure and hypocenter migration. *Tectonophysics*, 733, 132-147.
- Yoshida, K., Hasegawa, A., Yoshida, T., & Matsuzawa, T. (2019a). Heterogeneities in stress and strength in tohoku and its relationship with earthquake sequences triggered by the 2011 M9 Tohoku-Oki earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 176(3), 1335-1355.
- Yoshida, K., Saito, T., Emoto, K., Urata, Y., & Sato, D. (2019b). Rupture directivity, stress drop, and hypocenter migration of small earthquakes in the Yamagata-Fukushima border swarm triggered by upward pore-pressure migration after the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Tectonophysics*, 769, 228184.