（2） 東北大学大学院理学研究科

松澤　暢（東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター）

1．はじめに

東北大学では，地震予知研究計画に基づき，1965 年度に秋田地殻変動観測所，1966 年度に本荘地震観測所，1967 年度に三陸地殻変動観測所，1969 年に北上地震観測所が設置された．青葉山地震観測所（1967 年に青葉山移転に伴い改称）を含めたこれらの観測所からのデータは 1974 年に設置された地震予知観測センターにオンラインで伝送されるようになった．その後，何度かの改組を経て，1997 年に理学部附属地震・噴火予知研究観測センターが設置され，1998 年に大学院附属へと転換して現在に至っている．これらの観測点からのデータや基盤観測網のデータにより，地震の発生に至る過程の解明が進んでおり，ここでは東北大学が中心となって明らかにしてきた最近 10 年間の成果について概要を報告する．なお，2011 年東北地方太平洋沖地震（以後，「東北沖地震」と呼ぶ）に関する成果は別の章でさらに詳しく報告する．

2．プレート境界型地震

小繰り返し地震の高周波成分の相関を調べてみたところ，低周波側で得られた発生時刻差とは異なる発生時刻差が得られる場合があることがわかった．これらの地震では高周波を生み出すパッチが震源域の中で偏った位置にあり，破壊の伝播方向が地震によって異なるために，この高周波パッチの破壊されるタイミングが変化して，このような現象が生じると解釈される [1]．

また，釜石沖の繰り返し地震も，2011 年東北地方太平洋沖地震の余効滑りが押し寄せてきた時期には，普段よりも再来間隔が短くなり，また規模が大きくなる現象が観測された．これは，余効滑りによって応力レートが増加したために，釜石沖のアスペリティの周りの条件付き安定領域でも地震性すべりが起こり，普段よりも規模が大きくなったと考えられる [2]．小繰り返し地震の中には，この余効滑り期間中にのみ生じたグループもあり（図 1），これも同様に条件付き安定領域のパッチが存在していたためと解釈できる [3]．

小繰り返し地震観測データからプレート境界の滑り速度を計算して丹念に調べてみたところ，数年周期で，滑り速度が周期的に変化しており，速度が大きい時期に M5 以上の地震が多発している領域が存在していることが分かった．この現象は陸上の GNSS 観測データからも確認でき，東北沖でもスロースリップイベントが周期的に発生している可能性が高いことが明らかになった [4]．

東北沖地震の主破壊域では，2008 年頃からプレート境界の滑り速度が加速しており，この時期に固着が緩んでいたと考えられる [5]．

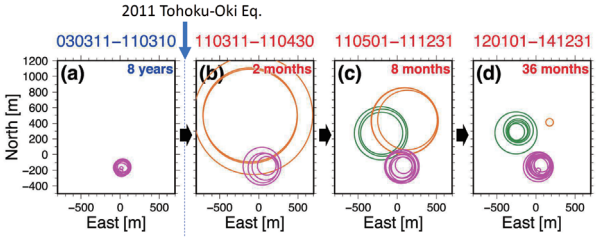

図 1　東北沖地震の余効滑りの時期にのみ観測された小繰り返し地震の例 3)．普段は存在しなかった場所で橙色や緑色で示された地震が発生し，次第に小さくなって消滅した．東北沖地震前から発生していた小繰り返し地震（桃色）も普段より規模が大きくなった．

宮城県沖周辺では，東北沖地震の前から海底地殻変動観測を実施していたので，本震のときの海底の変位分布が詳細に捉えられ [6]，これによって，本震時に海溝付近が約 50m も滑ったことが明確になった [7]．

海底圧力計のデータ等により，2011 年 2 月に東北沖地震の主破壊域のあたりでスロースリップイベントが生じていたことが明らかになっており [8]，これが 2 月の群発地震を発生させたのちに 3 月 9 日の最大前震をトリガし，その前震の余効滑りが本震をトリガしたと考えられる [9]．

この地震の海域の余効変動も海底地殻変動観測によって捉えられ [10]，余効滑りのみならず粘性緩和も大きく生じていることが明らかになった [11]．

波形の相似性から推定されたプレート境界での余震活動については，本震主破壊域では生じていない一方，本震すべり域の周辺で非常に活発に生じていることがわかった [12]．さらに，GNSS 観測データと小繰り返し地震データからも，余効滑り分布が地震時滑り分布と相補的になることが確かめられた [13]．また，太平洋プレートのみならず，フィリピン海プレートの表面でも，滑り速度の加速が見られた [14]．

この地震の震源域周辺の構造を地震波トモグラフィで詳細に調べたところ，主破壊域のあたりの岩盤の地震波速度が高いことがわかった [15) 16]．これはアスペリティのところの岩盤が固いことを示唆しており，今後，S-net のデータで地震波速度構造が詳細に調べられれば，将来の大地震の発生域の候補を絞り込むことができると期待される．

一方，本震の発生前と後の地震の発震機構解の変化

から，プレート境界にかかっていた剪断応力がこの地震によりほとんどすべて解消されたことがわかった[17) 18)]．これは，プレート境界の強度が数十 MPa 程度しかなくても，M9 の巨大地震を起こせることを意味しており，巨大地震の発生ポテンシャルを評価するうえで，非常に重要な知見である．

この地震を契機として，GNSS 観測データのリアルタイム処理が進み[19)]，海底津波観測データのリアルタイム処理[20)]とあわせて，将来的には津波予測が迅速かつ高精度に行えるようになると期待される[21) 22)]．

3．内陸地震とスラブ内地震

東北沖地震後に福島県から茨城県にかけての領域の地震活動が活発化したが，わずか 5 年 9 ヶ月の間をおいただけで同じ活断層の同じ場所で M6 の地震が発生したことがわかった[23)]．これ以外にも東北地方内陸では東北沖地震後に地震活動が活発化した場所が多数あり[24)]，その多くは震源のマイグレーションが見られる[25)]ことから，東北沖地震の強震動によって地下のシールが破れて流体が流入して地震活動をトリガしたと考えられる．

これらの観測事実や，発震機構解と地形に相関が見られること[26)]は，東北地方内陸で発生している地震は数十 MPa 程度の剪断応力で発生していることを示唆している．実際，2003 年宮城県北部の地震[27)]，2008 年岩手 - 宮城内陸地震[28)]，2011 年福島県浜通り地震[29)]等では本震に伴う応力場の回転が生じており，これは本震前の剪断応力が小さかったことを示している．

また東北沖地震後に仙台[30)]や山形 - 福島県境[31)]で群発地震が生じたが，これらはいずれも震源分布が多数の面状構造を示して深部から浅部へのマイグレーションが見られること（図 2）や，地震活動や断層強度等が同期して時間変化していること[32) 33)]などから，深部からの水の流入によって群発地震が生じたと考えられる．

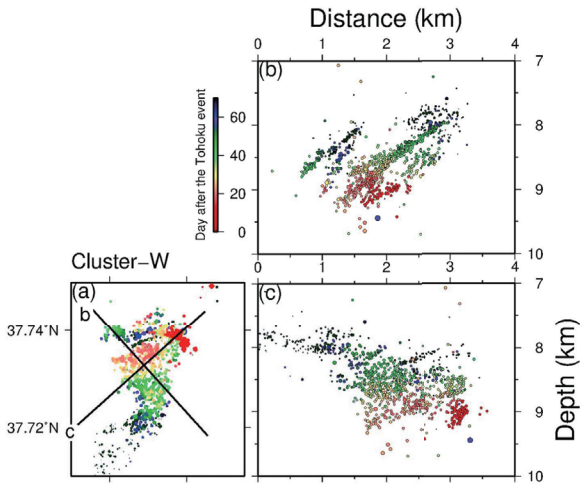

図 2　山形 - 福島県境付近で生じた群発地震活動内の一つのクラスターの震源分布[33)]．(a) 平面図．(b)，(c) 平面図内の黒線の範囲の断面図．色は東北沖地震発生からの日数を表す．

これらの水は沈み込んだスラブから供給されていることが地震波速度構造から示唆されていたが，地震波の減衰構造[34)]や比抵抗構造[35)]からも，この仮説を支持する結果が得られた．また二重深発地震面の上面の地震が活発に生じている場所では，水が存在しない場合に期待される地震波速度よりも遅くなっている[36) 37)]ことが明らかとなり，相転移に伴う脱水により地震活動が活発化している可能性が高いことが確かめられた．

4．おわりに

東北沖地震の発生によって，建議による計画は災害軽減をより一層志向したものに変わってきており，これらの研究を社会にどう生かすのか，ということを深く考えて研究を進めることが要請されている．今後は地震の基礎研究のみならず，地震の発生予測の幅を狭め，またハザードの予測に繋がる研究をさらに進展させる必要があり，それが今後 10 年の大きな課題である．

参考文献

1) Hatakeyama, N., N. Uchida, T. Matsuzawa, T. Okada, J. Nakajima, T. Matsushima, T. Kono, S. Hirahara, and T. Nakayama, 2016. Variation in high-frequency wave radiation from small repeating earthquakes as revealed by cross-spectral analysis. *Geophys. J. Int.*, 20, 1030-1048.
2) Uchida, N., K. Shimamura, T. Matsuzawa, and T. Okada, 2015. Postseismic response of repeating earthquakes around the 2011 Tohoku-oki earthquake: Moment increases due to the fast loading rate. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 259-274.
3) Hatakeyama, N., N. Uchida, T. Matsuzawa, and W. Nakamura, 2017. Emergence and disappearance of interplate repeating earthquakes following the 2011 M9.0 Tohoku-oki earthquake: Slip behavior transition between seismic and aseismic depending on the loading rate. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 5160-5180.
4) Uchida, N., T. Iinuma, R. M. Nadeau, R. Bürgmann, and R. Hino, 2016. Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan. *Science*, 351, 488-492.
5) Uchida, N., and T. Matsuzawa, 2013. Pre- and post-seismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 374, 81-91.

6) Kido,M., Y. Osada, H. Fujimoto, R. Hino, and Y. Ito, 2011. Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L24303.
7) Iinuma T., R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto, and S. Miura, 2012. Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 117, B07409.
8) Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, and M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, J. Ashi, 2013. Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Tectonophysics*, 600, 14-26.
9) Ohta, Y., R. Hino, D. Inazu, M. Ohzono, Y. Ito, M. Mishina, T. Iinuma, J. Nakajima, Y. Osada, and H. Fujimoto, K. Tachibana, T. Demachi, S. Miura, 2012. Geodetic constraints on afterslip characteristics following the March 9, 2011, Sanriku-oki earthquake, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L16304.
10) Tomita, F, M. Kido, Y. Ohta, T. Iinuma, and R. Hino, 2017. Along-trench variation in seafloor displacements after the 2011 Tohoku earthquake. *Science Adv.*, 3, e1700113.
11) Sun, T., K. Wang, T. Iinuma, R. Hino, J. He, H. Fujimoto, M. Kido, Y. Osada, S. Miura, and Y. Ohta and Y. Hu, 2014. Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Nature*, 514, 84-87.
12) Nakamura, W., N. Uchida, and T. Matsuzawa, 2016. Spatial distribution of the faulting types of small earthquakes around the 2011 Tohoku-oki earthquake: A comprehensive search using template events. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 2591-2607.
13) Iinuma, T., R. Hino, N. Uchida, W. Nakamura, M. Kido, Y. Osada, and S. Miura, 2016. Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku earthquake. *Nature Comm.*, 7:13506.
14) Uchida, N., Y. Asano, and A. Hasegawa, 2016. Acceleration of regional plate subduction beneath Kanto Japan, after the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 9002-9008.
15) Zhao, D., Z. Huang, N. Umino, A. Hasegawa, and H. Kanamori, 2011. Structural heterogeneity in the megathrust zone and mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0). *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17308.
16) Liu, X., and D. Zhao, 2018. Upper and lower plate controls on the great 2011 Tohoku-oki earthquake. *Science Adv.*, 4, eaat4396.
17) Hasegawa, A., K. Yoshida and T. Okada, 2011. Nearly complete stress drop in the 2011 Mw9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, 63, 703-707.
18) Hasegawa, A., K. Yoshida, Y. Asano, T. Okada, T. Iinuma and Y. Ito, 2012. Change in stress field after the 2011 great Tohoku-Oki earthquake. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 355-356, 231-243.
19) Ohta, Y., T. Kobayashi , H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Iinuma, and K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono, N. Umino, 2012. Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki Earthquake (Mw 9.0). *J. Geophys. Res.*, 117, B02311.
20) Tsushima, H., R. Hino, Y. Tanioka, F. Imamura, and H. Fujimoto, 2012. Tsunami waveform inversion incorporating permanent sea floor deformation and its application to tsunami forecasting. *J. Geophys. Res.*, 117, B03311.
21) Tsushima, H., and Y. Ohta, 2014. Review on near-field tsunami forecasting from offshore tsunami data and onshore GNSS data for tsunami early warning. *J. Disast. Res.*, 9, 339-357.
22) Tsushima, H., R. Hino, Y. Ohta, T. Iinuma, and S. Miura, 2014. tFISH/RAPiD: rapid improvement of near-field tsunami forecasting based on offshore tsunami data by incorporating onshore GNSS data. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3390-3397.
23) Fukushima, Y., S. Toda, S. Miura, D. Ishimura, J. Fukuda, T. Demachi, and K. Tachibana, 2018. Extremely early recurrence of intraplate fault rupture following the Tohoku-Oki earthquake. *Nature Geo.*, 11, 777-781.
24) Okada, T., K. Yoshida, S. Ueki, J. Nakajima, N. Uchida, T. Matsuzawa, N. Umino, A. Hasegawa, and Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, 2011. Shallow inland earthquakes in NE Japan possibly triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, 63, 749-754.

25) Okada, T., T. Matsuzawa, N. Umino, K. Yoshida, A. Hasegawa, H. Takahashi, T. Yamada, M. Kosuga, T. Takeda, and A. Kato, T. Igarashi, K. Obara, S. Sakai, A. Saiga, T. Iidaka, T. Iwasaki, N. Hirata, N. Tsumura, Y. Yamanaka, T. Terakawa, H. Nakamichi, T. Okuda, S. Horikawa, H. Katao, T. Miura, A. Kubo, T. Matsushima, K. Goto, and H. Miyamachi, 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, 293-309.

26) Yoshida, K., A. Hasegawa, and T. Okada, 2015. Spatial variation of stress orientations in NE Japan revealed by dense seismic observations. *Tectonophysics*, 647-648, 63-72.

27) Yoshida, K., A. Hasegawa, and T. Okada, 2016. Heterogeneous stress field in the source area of the 2003 M6.4 Northern Miyagi Prefecture, NE Japan, earthquake. *Geophys. J. Int.*, 206, 408-419.

28) Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Okada, and T. Iinuma, 2014. Changes in the stress field after the 2008 M 7.2 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake in northeastern Japan. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 9016-9030.

29) Yoshida, K., A. Hasegawa, and T. Okada, 2015. Spatially heterogeneous stress field in the source area of the 2011 Mw6.6 Fukushima- Hamadori earthquake, NE Japan, probably caused by static stress change. *Geophys. J. Int.*, 201, 1060–1069.

30) Yoshida, K., and A. Hasegawa, 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.

31) Yoshida, K., A. Hasegawa, and T. Yoshida, 2016. Temporal variation of frictional strength in an earthquake swarm in NE Japan caused by fluid migration. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 5953-5965.

32) Yoshida, K., T. Saito, Y. Urata, Y. Asano, and A. Hasegawa, 2017. Temporal changes in stress drop, frictional strength, and earthquake size distribution in the 2011 Yamagata-Fukushima, NE Japan, earthquake swarm, caused by fluid migration. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 10,379-10,397.

33) Yoshida, K., and A. Hasegawa, 2018. Hypocenter migration and seismicity pattern change in the Yamagata-Fukushima border, NE Japan, caused by fluid movement and pore pressure variation. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 5000-5017.

34) Nakajima, J., S. Hada, E. Hayami, N. Uchida, A. Hasegawa, S. Yoshioka, T. Matsuzawa, and N. Umino, 2013. Seismic attenuation beneath northeastern Japan: Constraints on mantle dynamics and arc mgmatism. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 5838-5855.

35) Ichiki, M, Y. Ogawa, T. Kaida, T. Koyama, M. Uyeshima, T. Demachi, S. Hirahara, Y. Honkura, W. Kanda, T. Kono, M. Matsushima, T, Nakayama, S. Suzuki, and H. Toh, 2015. Electrical image of subduction zone beneath northeastern Japan. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 7937-7965.

36) Shiina T., J. Nakajima, and T. Matsuzawa, 2013. Seismic evidence for high pore pressure in the oceanic crust: Implications for fluid-related embrittlement. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2006-2010.

37) Shiina, T., J. Nakajima, T. Matsuzawa, G. Toyokuni, and S. Kita, 2017. Depth variations in seismic velocity in the subducting crust: Evidence for fluid-related embrittlement for intermediate-depth earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 810-817.