

12-10 地震発生への水の役割

Role of crustal fluid on earthquake occurrence

加藤愛太郎（東京大学地震研究所）

Aitaro Kato (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

地震の発生と水との関連性については、長年にわたって議論がおこなわれてきている (e.g., Mogi, 1989; Shapiro et al., 2002; Miller et al., 2004). 水がどのような仕組みで地震の発生を促進しているのか、という地震発生過程を考える上で根本的な課題について、下記の3つの観点から議論をおこなう。

一つ目は、震源断層への応力載荷過程などの長期的な時間スケールにおける水の役割である。これまでの多くの先行研究により、内陸地震の震源域の深部延長には、水などの流体が存在する可能性が指摘されている (e.g., Iio et al., 2002). もし流体が震源断層域の深部延長に局在化している場合、その近傍の岩石の変形強度が周囲よりも低下することで変形が進み、その上部に位置する既存断層への応力（ひずみ）集中をもたらすことが考えられる。たとえば、日本海拡大時に形成されたリフト内（上部地殻）の既存断層の深部には、地震波速度が遅い領域や高い電気伝導度の領域が局所的に存在しており、応力載荷過程において流体が重要な役割を担っている可能性が指摘されている (e.g., Kato et al., 2009).

短期的な時間スケールにおいては、間隙水圧の一時的な増加による断層強度の低下に関連した地震活動が挙げられる。たとえば、2011年東北地方太平洋沖地震の発生直後には、東北日本の内陸部において活発な地震活動が発生した (Okada et al., 2015). いくつかの地震活動においては、時間とともに地震活動域が拡散様式に従って拡大する現象が確認されている (図1). また、震源域の深部には、地震波が低速度で高い電気伝導度の領域が存在しており、水などの流体の関与が考えられることが指摘されている (e.g., Kato et al., 2013; Okada et al., 2015; Umeda et al., 2015). これらの誘発地震活動は、東北地方太平洋沖地震による静的な応力変化に加えて、地下深部からの流体移動により間隙水圧が一時的に上昇し、断層強度が低下することで活発化したと解釈できる。また、海外のドイツ南部の山岳地域においては、降雨量と地表付近の地震活動度に良い相関がみられることが報告されている。降雨の地下への浸透により、震源域において間隙水圧がわずかに増加（約1 kPa：地球潮汐による応力変化程度）することで、地震活動が活発化するという数理モデルが提案されており、降雨量等の関数として地震活動の発生予測実験も試行されている (e.g., Hainzl et al., 2006; 2013).

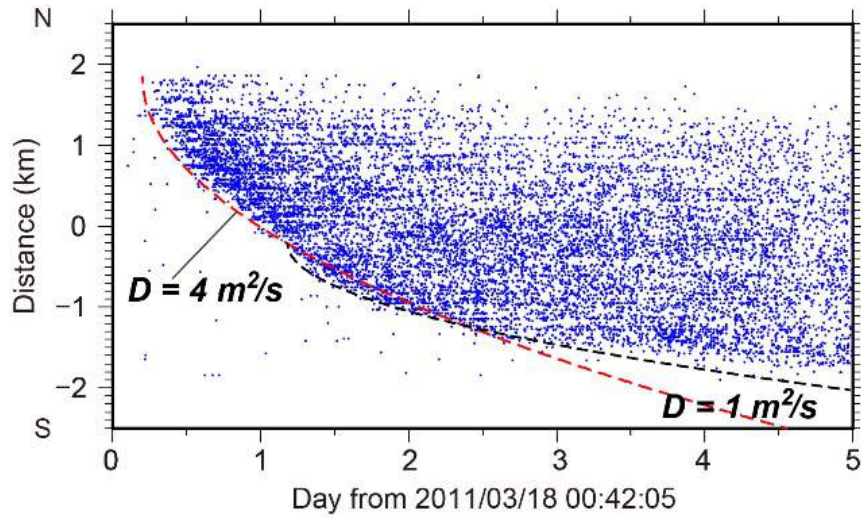
上記に加えて、地下水の汲み上げや融雪にともなう地表付近の荷重変化により、震源域への応力変化が引き起こされた結果、地震活動が活発化したと考えられる例が近年報告されている。たとえば、スペインにおいては約50年間の地下水の汲み上げにより、2011年にM5.1の地震が発生したと指摘されており、地下水の汲み上げに伴う震源断層面上における応力変化は約10 kPaと推定されている (González et al., 2012). また、アメリカ合衆国西部においては、灌漑用水の利用や融雪等による表層荷重変化が、震源断層上に約1 kPaの応力変動を生み出すことにより、夏から秋にかけて地震活動が高まる傾向にあることが解釈されている (e.g., Johnson et al., 2017).

以上3つの観点から地震発生に与える水の役割について説明したが、長期的時間スケールにおいては、応力載荷過程に対する水の効果の定量的な評価を進める必要がある。また、短期的な時間スケールにおいては、わずかな間隙水圧や表層荷重変化により地震活動度が影響を受けている可能性

が考えられ、今後の継続的な研究が重要な段階である。

【参考文献】

- 1) Mogi, K. (1989), The mechanism of the occurrence of the Matsushiro earthquake swarm in central Japan and its relation to the 1964 Niigata earthquake, *Tectonophysics*, 159, 109–119, doi:10.1016/0040-1951(89)90173-X.
- 2) Shapiro, S. A., E. Rothert, V. Rath, and J. Rindschwentner (2002), Characterization of fluid transport properties of reservoirs using induced microseismicity, *Geophysics*, 67, 212–220.
- 3) Miller, S.A., et al. (2004), Aftershocks driven by a high-pressure CO₂ source at depth, *Nature*, 427, 724–727, doi:10.1038/nature02251.
- 4) Iio, Y., T. Sagiya, Y. Kobayashi, and I. Shiozaki, (2002), Water-weakened lower crust and its role in the concentrated deformation in the Japanese Islands, *Earth and Planetary Science Letters*, 203, 245–253.
- 5) Kato, A., et al. (2009), Reactivation of ancient rift systems triggers devastating intraplate earthquakes, *Geophysical Research Letters*, 36, L05301, doi:10.1029/2008GL036450.
- 6) Okada, T., et al. (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.
- 7) Kato, A., et al. (2013), Imaging the source regions of normal faulting sequences induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki, *Geophys. Res. Lett.*, 40, doi:10.1002/grl.50104.
- 8) Umeda, K., K. Asamori, A. Makuuchi, K. Kobori, and Y. Hama (2015), Triggering of earthquake swarms following the 2011 Tohoku megathrust earthquake, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 2279–2291, doi:10.1002/2014JB011598.
- 9) Hainzl, S., T. Kraft, J. Wassermann, H. Igel, and E. Schmedes (2006), Evidence for rainfall-triggered earthquake activity, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L19303, doi:10.1029/2006GL027642.
- 10) Hainzl, S., Y. Ben-Zion, C. Cattania, and J. Wassermann (2013), Testing atmospheric and tidal earthquake triggering at Mt. Hochstaufen, Germany, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 5442–5452, doi:10.1002/jgrb.50387.
- 11) González, P. J., et al. (2012), The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal unloading, *Nat. Geosci.*, 5, pp. 821–825, 10.1038/ngeo1610.
- 12) Johnson, C. W., Y. Fu, and R. Burgmann (2017), Seasonal water storage, stress modulation, and California seismicity. *Science*, 356 (6343), 1161–1164.



第 1 図 左) 2011 年東北地方太平洋沖地震後に、山形・福島県境で活発化した地震活動の時空間発展図を示す。黒色と赤色の破線は拡散様式に従う地震活動域のフロントを表す。数値は、拡散係数を示す。

Fig. 1 Left) A space and time diagram of a seismicity detected by matched filter technique at boundary between Yamagata Pref. and Fukushima Pref. Black and red broken lines denote parabolic envelope signature of assumed diffusivities.