

11 - 11 日本海溝沿いの繰り返し地震活動とその繰り返しの特徴

The activity of repeating earthquakes along the Japan trench and its characteristics of repetition

内田 直希 (東京大学地震研究所)

Naoki Uchida (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

小中規模の繰り返し地震は、数年程度の短い期間で断層上の同じ場所で起こる¹⁾。繰り返し地震は、大地震のミニチュア版として、あるいは断層上のクリープメータとして用いることができ、中期的な地震発生予測の高度化に貢献できると考えられる。具体的には、大地震のミニチュア版としては、複数の地震サイクルにわたる観測に基づき行うことで、大地震では難しい知見の取得が期待できる。また、断層上のクリープメータとしては、断層そのものの上でのすべりの値を得ることができるため、地表での観測に比べより微小なすべりを検知できる可能性があり、大地震の発生との関係も調査することができる。

1. 大地震のミニチュア版としての活用例

1.1 将来の震源域周辺での地震活動の時空間変化に関する普遍的な特徴の解明

岩手県釜石沖の地震クラスターでは、M5 程度の繰り返し地震の間の期間に発生する小地震が、5 年程度のサイクルの後半で活発であることが知られていた。この地震クラスターについて精密震源決定を行うと、小地震が M5 クラスの地震のすべり域の内部や端に位置していることがわかった²⁾。同じような階層性は北海道沖や茨城県沖でも発見された^{3,4)}。他、M9.0 の東北沖地震でも指摘されており⁴⁾地震規模によらず普遍的な現象であると考えられる。東北沖地震直後には、釜石沖の地震クラスターでの最大地震の発生間隔は、1 ヶ月以内と非常に短くなった。しかし、地震サイクルの序盤に小地震の活動が小さく、その後増えるという特徴は保存されていた (第 1 図)。このようなすべり域内の地震活動は、固着域での応力状態を反映している可能性が考えられる。このことは、将来の破壊域での地震活動をモニタリングすれば、地震サイクルの中での位置を推定できる可能性を示す。

1.2 地震の規模を決める要因の解明

前述の釜石沖の地震クラスターでは、2011 年の東北沖地震後、それまでに比べマグニチュードが 1 程度大きい地震が起き、その後マグニチュードが減少していくという変化が見られた⁵⁾。同様の変化が東北沖地震による余効すべりが大きかった領域で発生した他の繰り返し地震系列でもみられ、余効すべりによる急速な载荷が、マグニチュード変化の要因と考えられた。波形インバージョンによるすべり域の範囲の推定⁵⁾やいくつかの小領域での繰り返し地震活動の推移⁶⁾ (第 2 図) から、大きくなった地震のすべり域はそれ以外に比べ広く、条件付き安定の振る舞いをする領域において急速な载荷の際に地震性すべりが起き、地震の規模が大きくなったと考えられる。このことは、载荷レートが将来起こる地震の規模を決める 1 つの要因となることを示す。

2. 断層上のクリープメータとしての活用例

2.1 固着域周辺での断層クリープのモニタリングによる地震発生確率の変化の推定

断層上で地震性すべりと非地震性すべり（クリープ）は互いに影響を及ぼしあっており、地震性すべりだけでなく、非地震性すべりの状況を知ることは非常に重要である。地震発生に関係した非地震性すべりとして、Uchida et al. 2013⁷⁾ や Mavrommatis et al., 2015⁸⁾ は、東北沖地震前の震源域での非地震性すべりの加速を繰り返し地震による断層クリープの観測から指摘している。また、東北沖では、数年周期で非地震性すべりの速度が時間変化しており、すべり速度が速い時期に M5 以上の地震が多く起きていたことが示された⁹⁾（第 3 図）。このような傾向は、地震の発生確率の時間変化の推定に活用できる可能性がある。

2.2 地殻変動 / 地震サイクルモデリングによる地震発生予測の高度化

前述の断層クリープの観測は、断層そのものでの変位の観測として重要であり、地殻変動や地震サイクルのモデリングにおいて重要な拘束条件となりうる。例えば、東北沖地震後の地殻変動のモデリング研究¹⁰⁾では、粘弾性緩和のパラメタの推定により、将来の変形も予測することができ、断層にかかる力の時間発展を予測することができる。また、地震サイクルのシミュレーションにおいても同様に、最適なパラメタの選定に用いることで、より現実的な将来予測に繋げることができる。東北沖の地震発生シミュレーションでは、宮城県沖地震の発生に加え、東北沖地震のすべり域での固着の時間変化も予測された¹¹⁾。繰り返し地震や地殻変動観測により断層上のクリープをモニタリングを継続することにより、モデルの高度化に貢献できると考えられる。

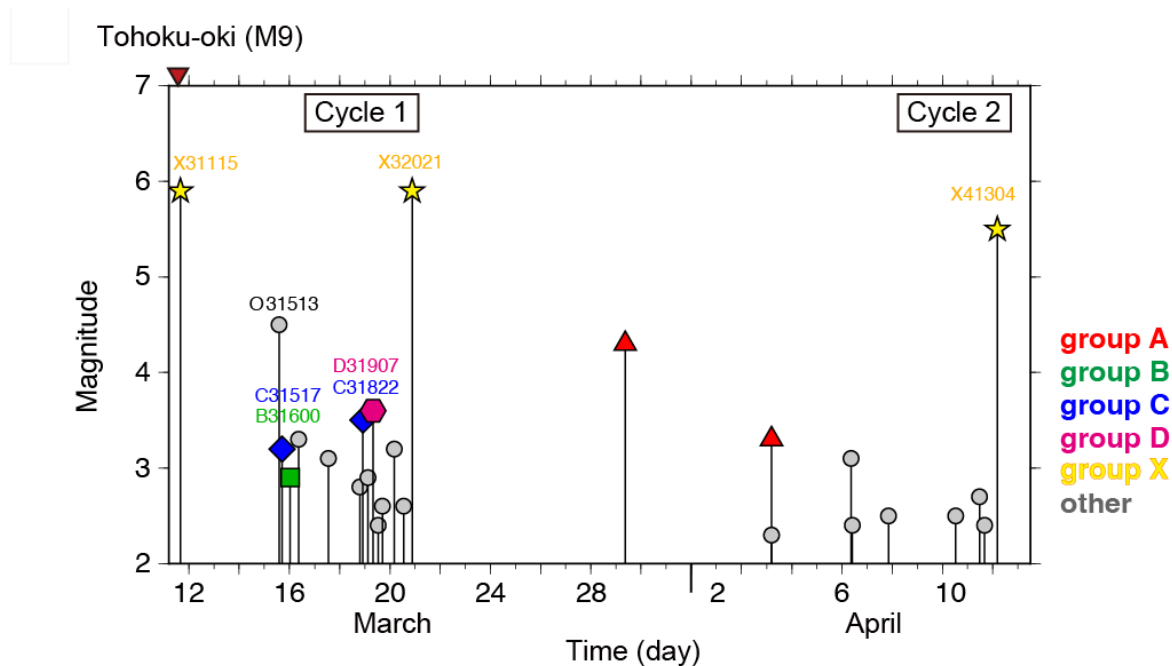
(内田 直希)

Naoki Uchida

参考文献

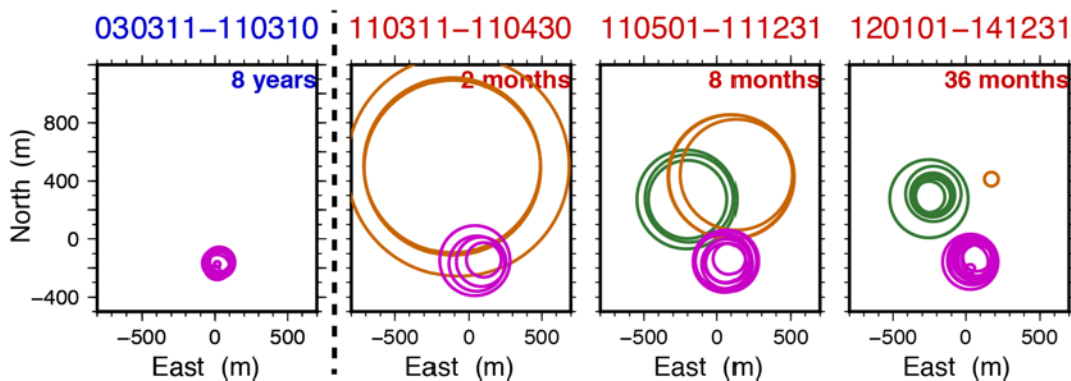
- 1) Uchida and Burgmann (2016), *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **47**, 305-332. Repeating earthquakes.
- 2) Uchida et al. (2012), *Geophys. J. Int.*, **189**, 999-1014. Source parameters of microearthquakes on an interplate asperity off Kamaishi, NE Japan over two earthquake cycles.
- 3) Okuda and Ide (2018), *Earth, Planets and Space*, **70**:132. Streak and hierarchical structures of the Tohoku–Hokkaido subduction zone plate boundary.
- 4) Chang and Ide (2021), *J. Geophys. Res.*, **126**(9), e2021JB021991. Hypocenter hotspots illuminated using a new cross - correlation - based hypocenter and centroid relocation method.
- 5) Uchida et al. (2015), *J. Geophys. Res.*, **120**(1), 259-274. Postseismic response of repeating earthquakes around the 2011 Tohoku-oki earthquake: Moment increases due to the fast loading rate.
- 6) Hatakeyama et al. (2017), *J. Geophys. Res.*, **122**(7), 5160-5180. 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.
- 7) Uchida and Matsuzawa (2013), *Earth Planet. Sci. Lett.*, **374**, 81-91. Pre- and post-seismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture.
- 8) Mavrommatis et al. (2015), *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 9717-9725. Long-term acceleration of aseismic slip

- preceding the Mw 9 Tohoku-oki earthquake: Constraints from repeating earthquakes.
- 9) Uchida et al. (2016), *Science*, **351**(6272), 488-492. Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan.
 - 10) Hu et al. (2016), *J. Geophys. Res.*, **12**, 385–411. Stress-driven relaxation of heterogeneous upper mantle and time-dependent afterslip following the 2011 Tohoku earthquake.
 - 11) Nakata et al. (2023), *Progress in Earth and Planetary Science*, **126(9)**, e2021JB021991. Recurrence intervals for $M > 7$ Miyagi-ken-Oki earthquakes during an $M \sim 9$ earthquake cycle.



第 1 図 2011 年東北沖地震直後の釜石沖地震クラスターでの地震活動。極端に発生が短くなった東北沖地震直後の 2 つの地震サイクルにおいても、サイクルの初めは地震活動が低い。[奥田・他 2018]

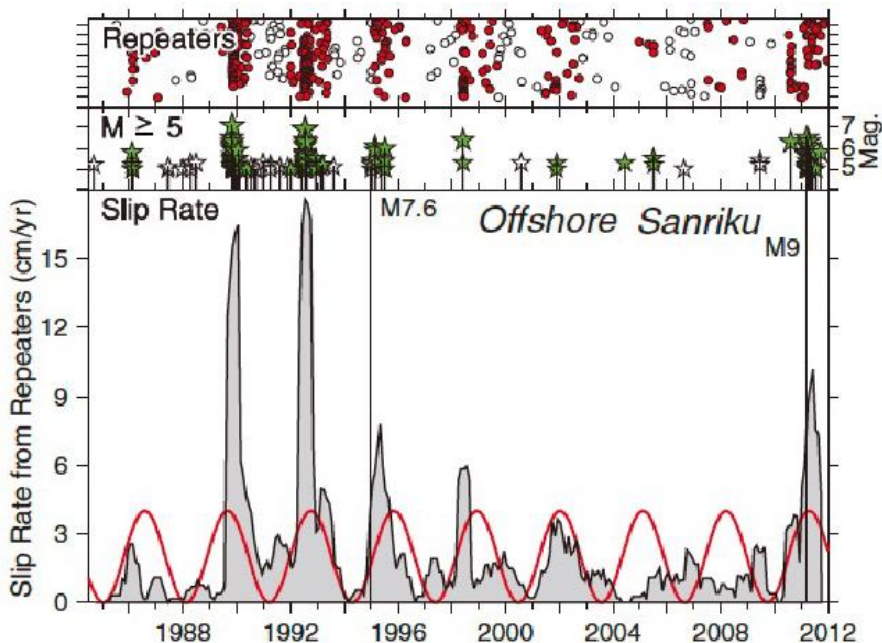
Fig. 1 The time-magnitude ploy of the seismicity at the Kamaishi-oki earthquake cluster just after the 2011 Tohoku-oki earthquake.



第 2 図 2011 年東北沖地震前後の三陸沖の地震活動の例。断層面を上から見た図で、丸のサイズは断層サイズを示す。

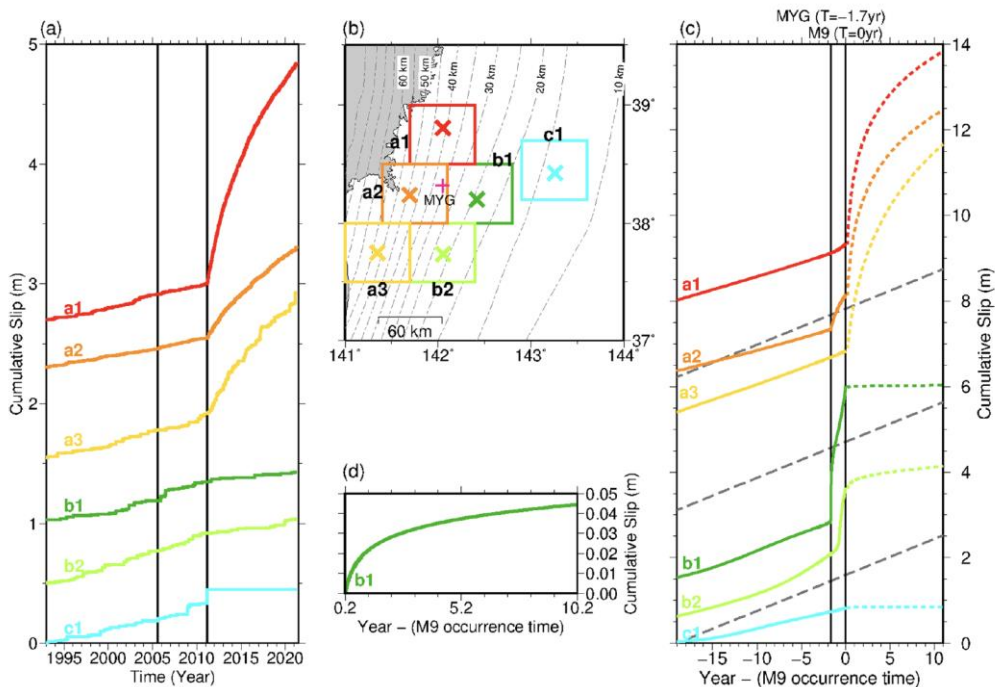
縦の破線で示す東北沖地震後、ピンクの繰り返し地震のサイズが大きくなったほか、その北部で大きな繰り返し地震が起きるようになり、その後全体的にサイズが小さくなっていった。[Hatakeyama et al., 2017].

Fig. 2 The spatio-temporal change of seismicity in a small region offshore Sanriku. The circle size represents the slip area of each earthquake. The slip area of the cyan-colored earthquake after the Tohoku-oki earthquake. A large earthquake (orange) stated to occur after the Tohoku-oki earthquake [Hatakeyama et al., 2017].



第 3 図 三陸沖の海溝近傍の領域における繰り返し地震活動（上段）、M5 以上の地震の活動（中段）および繰り返し地震から推定したすべりレート（下段）。すべりレートが高い時期に M5 以上の地震が集中して起きている。 [Uchida et al. 2016].

Fig. 3 The activity of repeating earthquakes at near-trench area off Sanriku (top), the activity of $M \geq 5$ earthquakes in the same area (middle), and slip rate estimated from repeating earthquakes. [Uchida et al., 2016].



第 4 図 宮城県沖における繰り返し地震から推定したプレート境界上の断層クリープの時間変化（左）と地震サイクルシミュレーションによる計算値（右）。 [Nakata et al. 2023].

Fig. 4 The temporal change of the aseismic slip estimated from the repeating earthquakes (a) and model predicted slip on the plate boundary (b). [Nakata et al., 2023].