# 12-6 東北沖超巨大地震発生サイクルとそれに伴う地殻変動モデリングの進展 Development in modeling Tohoku-oki megathrust earthquake cycles and the associated crustal deformation processes

芝崎 文一郎 (建築研究所) Bunichiro Shibazaki (Building Research Institute)

## 1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震(以下では東北沖地震と記載する)ではプレート境界浅部で巨大な 断層すべりが生じた<sup>1)</sup>. なぜ東北沖地震が発生したのかを明らかにするために, 地震発生直後から 様々な超巨大地震発生サイクルモデルが提案されてきた. また, 東北沖地震後には, 余効変動(余 効すべり+粘弾性緩和)が生じ, 様々なモデル化が行われてきた. 特に, 宮城県沖の海溝付近で, 西北西の方向及び沈降の運動が起きており,粘弾性緩和過程によることが示されてきた.本稿では, 東北沖地震後の 10 年間における地震発生サイクルモデルと地殻変動モデリングの進展について報 告する.

### 2. 東北沖超巨大地震発生サイクルモデル

およそ 600 年間隔で発生する超巨大地震と数 10 年間隔で発生する M7クラスの地震を再現する ために,東北沖浅部に強いアスペリティが存在するモデル,階層アスペリティモデル(M7クラス の地震は小さな臨界変位量,M9クラスの地震は大きな臨界変位量を有するモデル)が提案されて きた.これらのモデルではすべり速度・状態依存則が用いられている.他方,岩石の摩擦実験で確 認されている動的弱化(高すべり速度で摩擦強度が大きく低下すること)を考慮したモデルも提案 された.高速での動的弱化は,実際の物理プロセスは異なるが,階層アスペリティモデルにおいて 一番大きな階層での破壊過程(大きな応力降下量,大きい臨界変位量)に対応していると考えられ る.

# 2-1. 浅部における強いアスペリティを設定したモデル

Kato and Yoshida (2011)<sup>2)</sup>は、東北沖プレート境界の浅部に応力降下が大きく臨界変位量の大きな 強いアスペリティを設定し、深部の宮城県沖には応力降下が小さく臨界変位量の小さな弱いアスペ リティを設定することで、深部の宮城県沖で、数 10 年間隔で発生する M7 クラスの地震と 700 年 間隔で発生する超巨大地震を再現するモデルを提案した. このモデルでは深さが 20 kmより浅い領 域で、応力降下量を大きくするために高有効圧と、大きな臨界変位量を仮定している.

## 2-2. 階層アスペリティモデル

Hori and Miyazaki (2011)<sup>3)</sup>は, M7クラスの地震は小さな臨界変位量, M9クラスの地震は大きな 臨界変位量を持つ階層アスペリティモデルを提案した.これにより,数10年間隔で発生する大地震 と数100年間隔で発生する超巨大地震を再現した. Ohtani et al., (2014)<sup>4</sup>は、東北沖地震を想定したより現実的な大規模準動的地震発生サイクルシミ ュレーションモデルを構築した. M7クラスの地震を発生させるために小さな臨界変位量を持つ小 さなアスペリティーを考慮し、M9クラスの地震を起こすために浅部の強いアスペリティとその周 辺の大きな臨界変位量を有し条件付き不安定になる領域を設定してモデル化を行った. シミュレー ション結果で、茨城県沖や宮城県沖で M7クラスの地震が数 10 年繰り返し発生すること、サイク ルの後半で福島沖で非地震性すべりが繰り返し発生することを再現した. 825 年に M7の前震が発 生し、その 62 日後に東北沖地震が開始することを再現した.

Nakata et al. (2016)<sup>5)</sup>も, M9クラスの地震を起こす大きな臨界変位量を有する大きなパッチと,小 さな臨界変位量を有する M7クラスの地震のパッチを考慮してモデル化を行った.シミュレーショ ン結果の一例として, 13 日前に M7.4 の前震が発生して本震の破壊が開始して拡がった.その後, 余効すべりが深部で発生して, 18 年後に宮城県沖地震が励起されることを再現した.121 のシナリ オについて調べており, M9の地震が発生してから M7クラスの宮城県沖地震が発生するまでの時 間間隔は, M9の地震発生前の宮城県沖地震の平均再来間隔の半分より短くなる場合が多いと報告 している.深部の余効すべりによって,宮城県沖地震のパッチに応力が加わり,短期間に励起され たと考えられる.さらに, M7の前震が発生しているが,東北沖地震の破壊域で十分に応力が蓄積 されている段階で M7クラスの地震が発生して,東北沖地震を励起したと考えられる.

#### 2-3. 高速での動的弱化を考慮したモデル化

岩石の高速摩擦実験では動的弱化(高すべり速度で摩擦強度が大きく低下すること)が起こることが示されており<sup>6)</sup>,高速摩擦特性を考慮したモデルが提案されている<sup>7)-9)</sup>.特に,断層すべりにより摩擦発熱が生じ間隙圧上昇が起こること(thermal pressurization; TP)で著しい強度の弱化が起こることが考えられており,Mitsui et al. (2012)<sup>8)</sup>や Noda and Lapusta (2013)<sup>9)</sup>が TP を考慮したモデル化を行っている.摩擦強度は,摩擦係数×(法線応力-間隙圧)で表現されるので,間隙圧が上昇すると摩擦強度が低下する.

Noda and Lapusta (2013)<sup>9)</sup>は、二つのパッチ A、B を考え、パッチ A の摩擦特性は、すべり速度 が低速では速度弱化で、高速では動的弱化が起きるとし、パッチ B の摩擦特性としては、低速では 速度強化、高速では TP による著しい動的弱化が起こるとした. このような特性を与えてシミュレ ーションを行った結果、パッチ A では比較的小さなすべりが短い間隔で発生するが、時々、パッチ A からの破壊がパッチ B に伝播して大きなすべりを生じる様子が再現できた. パッチ A では、地震 間は固着しているが、パッチ B では、地震前にクリープしている場合もあり、パッチ A からの破壊 が伝播し、TP による動的弱化によって大きなすべりが生じることが示された.

### 2-4. JFAST の成果(浅部断層摩擦特性)を考慮したモデル化

東北地方太平洋沖地震調査掘削(JFAST)では、「ちきゅう」より浅部の断層の掘削が行われて おり、地震時に動いた断層のサンプルを直接採取されている<sup>10)</sup>.地震時すべりが生じた断層帯に温 度計を設置し、摩擦熱を推定することに成功している<sup>11)</sup>.プレート境界断層浅部では、変形はスメ クタイトを大量に含む遠洋性粘土層に沿って局所化していること<sup>9)</sup>、プレート境界断層物質は低摩 擦<sup>12)</sup>,低透水率であること<sup>13)</sup>が示された.

JFAST で採取されたコアサンプルを用いた摩擦実験が行われており、その実験結果を用いて、浅 部での巨大地震時すべりが再現できるかを検証するシミュレーションが幾つか行われた. Noda et al., (2017)<sup>14)</sup>は、Sawai et al. (2017)<sup>15)</sup>の実験に基づいて得られた摩擦特性の分布を考慮してモデル化を行 った(図1).海溝付近では、すべり速度が低速では速度弱化、ある程度速くなると速度強化、さ らに高速になると TP による動的弱化を起こす.海溝から 60~80km の領域では、低速では速度強化 で、高速になると速度弱化、さらに高速になると TP による動的弱化を起こす.通常の地震発生域 では、速度弱化の摩擦が働いている.シミュレーション結果では、およそ 50mのすべりを有する超 巨大地震が 550 年間隔で発生している様子がわかる.また、深部では大地震が 50 年間隔で発生し ている様子も再現できている.

さらに,Shibazaki et al. (2019)<sup>16</sup>は三次元のモデルで浅部の摩擦特性(低速では速度弱化,高速で は速度強化の特性,さらに TP による動的弱化)を考慮して,準動的地震発生サイクルシミュレー ションを行った.三陸沖では浅部摩擦特性の領域を少し広めに設定した.シミュレーション結果で は,23日前に前震が起きて,その後 M9の地震が起きている.地震時に浅部でゆっくりと破壊が拡 がってる様子が再現できている.さらに M9地震発生後の温度変化のシミュレーション結果では, 掘削地点で2年後も0.3度の温度上昇が起こっている様子が再現できている.これはJFASTで得ら れた,プレート境界断層では周囲より0.3度高い温度異常が起きていたという観測事実<sup>11</sup>)と調和的 である.

#### 2-5. 粘弾性構造を考慮した超巨大地震の発生モデル

次に,粘弾性構造とプレート境界におけるセグメント構造を考慮した Barbot (2020)<sup>17)</sup>による最新 の東北沖地震のサイクルモデルを紹介する.Barbot (2020)<sup>17)</sup>は,積分方程式法により粘弾性構造を考 慮した東北沖地震の発生サイクルモデルを構築した.このモデルでは,弾性定数は均質であるが, 粘性構造には不均質性を考慮できる.プレート境界のセグメント構造では宮城県沖地震に対応して いる部分 (Mantle wedge corner)で地震が発生するように不安定的な摩擦の性質を与えている.浅部 のセグメントでは応力降下量が大きくなるように設定している.シミュレーション結果では,宮城 県沖地震の発生域で,数十年間隔で地震が発生する様子が再現できている.また,浅部のセグメン トでの破壊を含む超巨大地震の発生サイクルも再現している.Barbot (2020)<sup>17)</sup>は,超巨大地震発生後 21日から 265日までの余効変動のシミュレーション結果と,観測された余効変動との比較を行って いる.水平動に関しては,観測をある程度再現できている.

#### 3. 東北沖超巨大地震発生に伴う地殻変動モデリング

超巨大地震発生に伴う地殻変動モデリングについて紹介する.余効変動については,宮城県沖で, 沈降,西北西の運動が起きているが,これは粘弾性緩和過程による<sup>18),19)</sup>.余効変動のモデル化に関 しては,これまでにたくさんの重要な研究が行われてきた<sup>18)-26)</sup>が,ここでは幾つかの研究を紹介す る.

Sun et al (2014)<sup>18)</sup>は, Burgers レオロジー(Maxwell 要素+Kelvin 要素;過渡的応答)を用いた粘弾

性構造,海洋リソスフィアとアセノスフィアの境界(Lithosphere-asthenosphere boundary; LAB)にお ける低粘性の領域,さらに Cold Nose(冷たい低粘性の前弧の存在)を考慮して,余効変動のモデル 化を行った.地震時に上盤側に大きな引張応力が加わって,それが粘弾性緩和過程の中で平衡状態 を保つように,海溝付近では西北西,陸域では東南東の運動が生じる.Freed et al. (2016)<sup>22)</sup>は,Cold nose,マントルウェッジ内の深さに依存する粘性構造,さらには,沈み込むスラブの下の低粘性領 域(プレートの曲がりにより応力が高くなっていると考えられる領域)を考慮した粘弾性構造を用 いたモデル化により,余効すべりの推定及び余効変動における水平動と上下動を説明することに成 功した.

Agata et al., (2019)<sup>25)</sup>は, 余効変動に関する大規模数値シミュレーションを行っている. 応力変化 駆動の余効すべりをすべり速度状態依存摩擦則を使って解いており, マントルの特性として非線形 粘弾性を考慮して解いている. Nakata et al. (2016)<sup>5)</sup>の地震サイクルのモデルの計算結果で得られた 地震時すべりを与えて粘弾性緩和過程をモデル化している. Agata et al. (2019)<sup>25)</sup>は非線形流動則を用 いており, 粘性係数は応力の n-1 乗に逆比例する. シミュレーション結果から, 東北沖地震によっ て大きな応力変動を受けて, 非線形流動特性により海洋リソスフィアの下のアセノスフィアで粘性 が急激に低下し, 高速流動が発生した可能性を指摘している.

東北日本内陸における余効変動の垂直変動に関しても議論が行われている<sup>26</sup>.太平洋沿岸では隆 起する一方で,脊梁山脈では沈降する.その原因として,地下深部での物性構造,特に火山列の地 下に柔らかい低粘性領域が存在するためであるということを報告している.

#### 4. 東北沖超巨大地震発生に伴う応力変動モデリング

最後に,東北沖地震前後における上盤内の応力場の変化について議論する. Hasegawa et al., (2012) <sup>27)</sup>は上盤側での主要な震源メカニズムが,地震前は逆断層であったのが地震後は正断層に変わった とこと,上盤側での応力が低応力であったことを報告している.地震前は低地震活動で東西圧縮の 逆断層地震が卓越していたが,地震後は海溝から170km以内では,P軸がほぼ垂直の正断層地震が 主で,海溝から170km以上離れた領域ではP軸が水平の逆断層地震が発生している.

このような応力変動をモデリングするために、プレート沈み込み(プレート境界に働く摩擦力・ 上盤内での曲げ応力)及び重力を考慮した島弧-海溝系の絶対応力場の二次元モデルが構築された <sup>28),29)</sup>. 媒質は粘弾塑性体を仮定し、重力を物体力として考慮し、海水層を含めた詳細な密度構造、 地形及び温度などのシミュレーション結果等に基づく不均質非線形レオロジーを考慮した. 10 万年 間のプレートの定常沈み込みを与えて長期応力場を形成した後、600 年間のプレート間固着とその 後の巨大地震時すべりを与え、2011 年東北沖地震前後における絶対応力場を再現した.

シミュレーションでは、前弧海域下の上盤内で、重力と曲げ応力により、浅部が引張の応力場が 形成された.また、摩擦力と曲げ応力によりプレート境界の直上で圧縮の応力場が形成された.東 北沖地震前は、プレート間固着によって圧縮場の差応力の増加(歪エネルギー増加)によって逆断 層地震が多発したと考えられる.地震後は地震時すべりにより引張場の差応力増加(歪エネルギー 増加)によって正断層型地震が多発したと考えられる.さらに、モデルから、東北沖におけるプレ ート境界の摩擦力は9Pa程度と非常に弱いことが推定された. 謝辞

本研究の一部は,新学術領域研究「地殻ダイナミクスー東北沖地震後の内陸変動の統一的理解ー」 (課題番号:26109007 及び 26109006)を受けて行われた.

# 参考文献

- Fujii, Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa (2011), Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japan earthquake, *Earth, planets and space*, 63, 815–820. doi:10.5047/eps.2011.06.010.
- 2) Kato, N., and S. Yoshida (2011), A shallow strong patch model for the 2011 great Tohoku-oki earthquake: A numerical simulation, *Geophysical Research Letters*, **38**(7). doi:10.1029/2011GL048565
- 3) Hori, T., and S. I. Miyazaki (2011), A possible mechanism of M 9 earthquake generation cycles in the area of repeating M 7~ 8 earthquakes surrounded by aseismic sliding, *Earth, planets and space*, 63(7), 773-777. doi:10.5047/eps.2011.06.022
- 4) Ohtani, M., K. Hirahara, T. Hori, and M. Hyodo (2014), Observed change in plate coupling close to the rupture initiation area before the occurrence of the 2011 Tohoku earthquake: Implications from an earthquake cycle model, *Geophysical Research Letters*, **41(6)**, 1899-1906. doi:10.1002/2013GL058751
- 5) Nakata, R., T. Hori, M. Hyodo, and K. Ariyoshi (2016), Possible scenarios for occurrence of M~ 7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation, *Scientific reports*, 6(1), 1-10. doi:10.1038/srep25704
- 6) Di Toro, G., D. L. Goldsby, and T. E. Tullis (2004), Friction falls towards zero in quartz rock as slip velocity approaches seismic rates, *Nature*, **427(6973)**, 436-439. doi:10.1038/nature02249
- 7) Shibazaki, B., T. Matsuzawa, A. Tsutsumi, K. Ujiie, A. Hasegawa, and Y. Ito (2011), 3D modeling of the cycle of a great Tohoku-oki earthquake, considering frictional behavior at low to high slip velocities, *Geophysical research letters*, 38(21). doi:10.1029/2011GL049308
- Mitsui, Y., N. Kato, Y. Fukahata, and K. Hirahara (2012), Megaquake cycle at the Tohoku subduction zone with thermal fluid pressurization near the surface, *Earth and Planetary Science Letters*, **325**, 21-26. doi:10.1016/j.epsl.2012.01.026
- 9) Noda, H., and N. Lapusta (2013), Stable creeping fault segments can become destructive as a result of dynamic weakening, *Nature*, 493(7433), 518-521. doi:10.1038/nature11703
- Chester F. M. et al. (2013), Structure and composition of the plate-boundary slip zone for the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, **342**, 1208–1211. doi:10.1126/science.1243719
- 11) Fulton P. M. et al. (2013), Low coseismic friction on the Tohoku-Oki fault determined from temperature measurements, *Science*, **342**, 1214–1217. doi:10.1126/science.1243641
- 12) Ujiie, K. et al. (2013), Low Coseismic Shear Stress on the Tohoku-Oki Megathrust Determined from Laboratory Experiments, *Science*, Vol.342, pp.1211-1214, doi:10.1126/science.1243485.
- 13) Tanikawa W, T. Hirose, H. Mukoyoshi, O. Tadai, and W. Lin (2013), Fluid transport properties in sediments and their role in large slip near the surface of the plate boundary fault in the Japan Trench, *Earth* and Planetary Science Letters, 382, 150–160. doi:10.1016/j.epsl.2013.08.052

- 14) Noda, H., M. Sawai, and B. Shibazaki (2017), Earthquake sequence simulations with measured properties for JFAST core samples, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 375(2103), 20160003. doi:10.1098/rsta.2016.0003
- Sawai, M., A. R. Niemeijer, T. Hirose, and C. J. Spiers (2017), Frictional properties of JFAST core samples and implications for slow earthquakes at the Tohoku subduction zone, *Geophysical Research Letters*, 44(17), 8822-8831. doi:10.1002/2017GL073460
- 16) Shibazaki, B., H. Noda, and M. J. Ikari (2019), Quasi-dynamic 3D modeling of the generation and afterslip of a Tohoku-oki earthquake considering thermal pressurization and frictional properties of the shallow plate boundary, *Pure and Applied Geophysics*, **176(9)**, 3951-3973. doi: 10.1007/s00024-018-02089-w
- 17) Barbot, S. (2020), Frictional and structural controls of seismic super-cycles at the Japan trench, *Earth, Planets and Space*, **72**, 1-25. doi:10.1186/s40623-020-01185-3
- 18) Sun, T. et al. (2014), Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Nature*, 514(7520), 84-87. doi: 10.1038/nature13778
- 19) Watanabe, S., M. Sato, M. Fujita, T. Ishikawa, Y. Yokota, N. Ujihara, and A. Asada (2014), Evidence of viscoelastic deformation following the 2011 Tohoku-Oki earthquake revealed from seafloor geodetic observation, *Geophysical Research Letters*, **41**, 5789–5796. doi:10.1002/2014GL061134
- 20) Yamagiwa, S., S. I. Miyazaki, K. Hirahara, and Y. Fukahata, (2015), Afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9. 0) inferred from inland GPS and seafloor GPS/Acoustic data, *Geophysical Research Letters*, 42(1), 66-73. doi:10.1002/2014GL061735
- 21) 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 communications*, 7(1), 1-9. doi:10.1038/ncomms13506
- 22) Freed, A. M., A. Hashima, T. W. Becker, D. A. Okaya, H. Sato, and Y. Hatanaka (2017), Resolving depthdependent subduction zone viscosity and afterslip from postseismic displacements following the 2011 Tohoku-oki, Japan earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, **459**, 279-290. doi: 10.1016/j.epsl.2016.11.040
- 23) Suito, H. (2017), Importance of rheological heterogeneity for interpreting viscoelastic relaxation caused by the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth, Planets and Space*, **69(1)**, 1-12. doi: 10.1186/s40623-017-0611-9
- 24) Noda, A., T. Takahama, T. Kawasato, and M. Matsu'ura (2018), Interpretation of offshore crustal movements following the 2011 Tohoku-oki earthquake by the combined effect of afterslip and viscoelastic stress relaxation, Pure and Applied Geophysics, 175(2), 559-572. doi:10.1007/s00024-017-1682-z
- 25) Agata, R., S. D. Barbot, K. Fujita, M. Hyodo, T. Iinuma, R. Nakata, T. Ichimura, and T. Hori (2019), Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake, *Nature communications*, **10(1)**, 1-11. doi:10.1038/s41467-019-08984-7
- 26) Muto, J., B. Shibazaki, T. Iinuma, Y. Ito, Y. Ohta, S. Miura, and Y. Nakai (2016), Heterogeneous rheology controlled postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophysical Research Letters*, 43(10), 4971-4978. doi:10.1002/2016GL068113

- 27) 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 and Planetary Science Letters*, 355, 231-243. doi:10.1016/j.epsl.2012.08.042
- 28) 芝崎文一郎, & 篠島僚平. (2019), 不均質レオロジー構造を考慮した島弧地殻における変形と応 力場のモデル化, 地学雑誌, 128(5), 813-834. doi:10.5026/jgeography.128.813
- 29) Sasajima, R., B. Shibazaki, H. Iwamori, and K. Yoshida, Modeling absolute stress field in Northeast Japan hanging wall before and after 2011 Tohoku earthquake, In preparation



- 第1図 JFAST 浅部断層物質の摩擦と高速での thermal pressurization を考慮した地震発生サイクルシミュレーション(Noda et al., 2017<sup>14)</sup>より)
  - (a)JFAST 断層物質のすべり速度に依存する摩擦特性. 海溝付近では, thermal pressurization (TP)による動的 弱化も起こると仮定.
  - (b)累積すべり量の分布. ピンクの線は地震時で 10 秒間隔の分布を示す. 緑の線は, 地震の直前と直後の 分布, 青線は 50 年間隔の分布を示す. 超巨大地震はおよそ 550 年間隔, 大地震はおよそ 50 年間隔で発 生している.
- Fig. 1 Simulation of Megathrust earthquake cycles considering the friction properties of JFAST shallow-fault zone materials and thermal pressurization at high speed (from Noda et al., 2017<sup>14</sup>)
  - (a)Slip velocity dependence of the friction property of JFAST fault-zone materials. It is assumed that dynamic weakening due to thermal pressurization (TP) also occurs near the trench.
  - (b)Distribution of cumulative slip amounts. The pink line shows the slip distribution at 10-second intervals during an earthquake. The green line shows the slip distribution immediately before and after the earthquake, while the blue line shows the slip distribution at 50-year intervals. Megathrust earthquakes occur at intervals of about 550 years, while large earthquakes occur at intervals of about 50 years.