

12-7 考えられるモデルのレビュー

Review of proposed models for generating the 2011 giant Tohoku earthquake

平原和朗 (京都大学大学院理学研究科)

Kazuro Hirahara (Graduate School of Science, Kyoto University)

1. はじめに

これまで報告されてきたように、2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0) (図1) は以下の特徴を持つ¹⁾ : 1)200x500kmに及ぶ広い破壊域, 2)宮城県沖浅部日本海溝近傍に50mを超える地震時特大すべり域, 3)ほぼ全応力の解放(多発する正断層タイプの余震から), 4)仙台平野の津波堆積物調査から450-850年で繰り返し発生(含む869年貞観地震), 5)震源域内の宮城県沖深部, 茨城県沖に繰り返し間隔20-40年のM7クラスのアスペリティ, 6)本震の2日前(3/9)にM7.3前震(FS), 7)地震前の福島沖でのプレート間固着の変化.

なぜこのような特徴を持つM9超巨大地震が発生したのか? これまでに提唱されてきた地震サイクルモデルおよび動的破壊モデルを概観する.

2. 地震サイクルモデル

速度・状態依存の摩擦構成則に基づき、プレート運動を駆動力とする、地震サイクルモデルを紹介する.

2.1 強パッチアスペリティ (SA) モデル

まず、宮城県沖のM7クラス震源域と海溝浅部での地震時特大すべり域を結ぶ2次元モデルである強パッチアスペリティ (SA) モデル²⁾を紹介する. 速度強化 ($a-b>0$) 特性を持つM9震源域中に、深部には通常速度弱化的 ($a-b<0$) アスペリティを、浅部には高い有効法線応力 (σ^{eff}) と大きな特徴的すべり距離 (L) を持つ強パッチ (アスペリティ) を置いている. 深部アスペリティは数十年の繰り返し間隔を持つM7地震を、浅部強パッチは数百年の地震サイクル中固着し続け、数10mにおよぶ特大地震時すべりと深部アスペリティ域に及ぶ地震時すべりを再現している.

2.2 階層アスペリティ (HA) モデル

破壊エネルギーがサイズに依存する階層アスペリティ (HA) モデル³⁾では、M9震源域を速度弱化的域とするが、そのサイズ r が震源核形成サイズ ($r_c \propto L/(b-a)$) と同程度になるように、 L すなわち破壊エネルギーを大きくとり、条件付き安定すべり特性を与え、震源域内部に L が小さく r_c が r より小さい通常速度弱化的アスペリティを設置している. 概念モデルではあるが、震源域内部に数十年の発生間隔を持つM7クラスの地震を持つ、数百年のM9地震サイクルを再現している.

2.3 SAモデルとHAモデルの比較

2.1は2次元、2.2は3次元平面プレート境界といった概念モデルであるのに対し、3次元プレート曲面を考慮して両者を比較した研究⁴⁾がある. 両者とも1.の特徴を再現可能であるが、M9地震後の地震サイクル前半での震源域での固着状態の相違により、宮城県沖深部アスペリティでの地震活動が異なる. SAモデルではM9地震後深部アスペリティの周りの速度強化域では大きなすべりが生じ、地震活動が活発化する. 一方HAモデルではM9地震の余効すべり収束後は、M9震源域は固

着し、地震サイクル前半では宮城県沖深部アスペリティでの活動は沈静化する。今後の宮城県沖深部アスペリティでの地震活動が注目される。

地震前の福島沖での固着状態の変化は、M9 地震発生の準備過程を表すという見方があるが、HA モデルではこの領域は条件付き安定すべり特性を持ち、M9 サイクル後半ではゆっくりすべりを繰り返し発生し、必ずしも直接的な準備過程を示している訳ではない。HA・SA モデルとも時間差は異なるが震源近傍での M7 クラス前震が直接のトリガーになっている。

2.4 2 状態変数モデル

岩石実験で示された高速すべりでの強い弱化を表す 2 状態変数を用いた 3 次元地震サイクルモデル⁵⁾が提唱されている。このモデルでは M9 震源域に、低から中程度のすべり速度域では速度強化、高速で速度弱化を示す摩擦特性を与えている。その中に通常の M7 クラスアスペリティと、浅部海溝近傍に高すべり速度では強い弱化と大きな L を持つ性質を与え、1. の特徴を再現している。このモデルは、結果として HA モデルに近い振る舞いを示す。

2.5 間隙流体の熱的加圧 (TP: Thermal Pressurization) による弱化モデル

上記モデルは、断層帯に含まれる間隙流体圧は一定としたモデルであるが、非排水条件下では断層帯に含まれる間隙流体が断層すべり発熱に伴う加圧 (TP) による有効法線応力が減少し、大きな応力降下と地震時大すべりが発生する。SA モデル²⁾の浅部強パッチの代わりに、ニュートラルな摩擦特性 ($a-b \sim 0$) を持つがこの TP を組み込み、数百年におよぶサイクルと特大すべりを再現したモデル⁶⁾が提唱されている。

これまでのモデルは、断層破壊による波動の影響を近似した準動的サイクルモデルであるが、動的破壊伝播と TP を組み込んだサイクルモデルも提唱されている⁷⁾。このモデルは、北部震源域での大きなすべりと低周波震動、南部での小すべり高周波強震動を生み出した 1999 年集集地震を説明するモデルで、北部では速度強化で TP が働き、南部では速度弱化で TP が働かないモデルとしている。東北地方太平洋沖地震の浅部と深部での特徴がこの北部と南部に類似しており、このモデルで説明可能としている。

3. 動的破壊モデル

1. で述べた浅部での特大地震時すべりの特徴に加えて、地震波形記録からは、浅部では低周波、深部強震動生成域から高周波の波が励起されたと推定されている。主としてすべり弱化則を用いた、シミュレーションにより、これらを説明する動的破壊伝播モデルが提唱されている。

3.1 沈み込む海山による高強度パッチモデル

震源の浅部域に高い強度と初期応力を持つパッチを置き、このパッチは破壊により特大すべりと大きな応力降下を引きおこし、浅部域のすべり強化域にまで破壊が達したとするモデルがあり、この高強度パッチは沈み込む海山によるとしている⁸⁾。また、このモデルでは深部に高強度パッチをおき高周波励起を再現している。

3.2 間隙流体の熱的加圧による弱化モデル

浅部特大すべり域に TP による動的弱化プロセスが働いて地震時に大きな応力降下と特大すべりを引き起こす動的破壊伝播シミュレーションが行われている⁹⁾。このモデルでは、M7 の前震や M9

地震前に発生した震源近傍での地震発生による震源域での応力増加が、TP を有効に働かせるのに必要であると主張している。

また、2.5 での動的地震サイクルモデル⁷⁾では、特大すべりを生じたイベントでは、速度弱化であるが TP が働かない深部からは高周波、速度強化域で TP が有効に働く浅部からは低周波励起を再現している。

3.3 オーバーシュートモデル

地震波解析から、破壊伝播は海溝軸まで達し、オーバーシュート（すべり過ぎ）を引き起こしたというモデル¹⁰⁾が提唱されている。また海底地形を含む不均質弾性媒質中での低角プレート境界 2 次元モデルを構築し、速度状態依存則に基づく動的破壊伝播シミュレーションにより、海溝近傍に速度強化域を持つ場合でも、海溝まで破壊が伝播し大きなすべりを生じることが報告されている¹¹⁾。

3.4 マルチスケールカスケード連動破壊モデル

すべり弱化モデルにおけるすべり弱化距離（Dc）すなわち破壊エネルギーはパッチサイズに比例する階層破壊伝播モデルで、M9 動的破壊モデルが提唱されている¹²⁾。このモデルでは、過去 100 年間に実際に発生した M6.6 以上の地震を震源域に分布させ、速度弱化モデルで M6.6 から M9 に比例してパッチサイズと Dc を設定して、各パッチの動的カスケード連動破壊シミュレーションによりいくつかの M9 地震時の特徴を再現している。このモデルでは、M9 地震へ破壊が成長するには、前震と震源付近に仮想の地震を設定して震源域への応力集中が必要としている。

4. クリティカルテーパー（クーロンウェッジ）モデル

最後に、海溝軸近傍での特大すべりの発生について、付加体の形成過程において展開されてきた、動的クリティカルテーパー理論に基づく議論¹³⁾を紹介する。この理論では、ウェッジのテイパー角 θ ($=\alpha+\beta$: 海溝軸近傍の陸側傾斜角 α , プレート沈み込み角 β) は、付加体の内部摩擦角とプレート境界の摩擦により決定されるが、これらは間隙流体比 λ を通して地震サイクル中変化する。温度場、鉱物の脱水、付加体内の応力場、この理論からプレート境界における地震時破壊伝播による間隙流体圧上昇に伴う非常に小さな有効摩擦係数を推定し、海溝軸での特大すべりや津波発生の要因としている。他にも重力バランスを考え大きな津波を生じたという議論¹⁴⁾もある。

これらの議論の多くは静的な釣り合いに基づくものであるが、クーロンウェッジ（動的破壊による間隙流体圧上昇による非弾性塑性変形）を考慮した、動的破壊シミュレーションが行われ、海溝近傍での特大すべりや巨大津波発生を議論¹⁵⁾している。

5. おわりに

M9 東北地方太平洋沖地震発生の特徴を説明するモデルを紹介し、なぜこの M9 超巨大地震が発生したかに答えようとした。しかし、依然未解明な部分が多い。特に、海溝軸近傍浅部での特大すべりは数百年間のすべり欠損の蓄積を意味するが、この浅部を含め M9 震源域内の摩擦特性は依然として明らかでない。余効すべりや今後の宮城県沖地震活動は重要な鍵となる。

更に、以下のシミュレーションの高度化も必要であろう。まず、3次元形状を持つプレート境界面において、地震間および地震時を通して速度状態依存に基づく摩擦力に加え間隙流体圧の変動を考慮した、動的地震サイクルシミュレーションが必要である。また、海底面形状や低角プレート境界といった幾何学的形状に加え、媒質の不均質性も地震サイクルに大きな影響を与える。既知の弾

性不均質構造に加え，粘弾性構造は長期の地震サイクルを考える上で重要となる．特に最後に議論したクリティカルテーパー理論で中心となる，幾何学形状，重力，非弾性クーロンウェッジ，分岐断層を含む動的な地震サイクル計算が必要となる．

参考文献

- 1) 平原和朗・澁谷拓郎, 2012, 2011 年東北地方太平洋沖地震 Mw9.0: 概要, 自然災害科学, 31-1, 3-22.
- 2) Kato, N. and S. Yoshida, 2011, A shallow strong patch model for the 2011 great Tohoku-oki earthquake: A numerical simulation, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L00G04, doi: 10.1029/2011GL048565.
- 3) Hori, T. and S. 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, Space*, 63, 773-777.
- 4) 大谷真紀子・平原和朗・堀高峰・兵藤守, 2011, 2011 年東北地方太平洋沖地震発生サイクルモデルの準動的シミュレーションによる比較検証, 日本地震学会 2011 年秋季大会, P1-13.
- 5) Shibasaki, B. et al., 2011, 3D modeling of the cycle of a great Tohoku-oki earthquake, considering frictional behavior at low to high slip velocities, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21305, doi:10.1029/2011GL049308.
- 6) Mitsui, Y., K. Naoyuki Kato, Y. Fukahata and K. Hirahara, 2012, Megaquake cycle at the Tohoku subduction zone with thermal fluid pressurization near the surface, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 325-326, 21-26.
- 7) Noda, H. and N. Lapusta, 2012, Stable creeping fault segments can become destructive as a result of dynamic weakening, *Nature*, 493, 518-523, doi:10.1038/nature11703.
- 8) Duan, B., Dynamic rupture of the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake: Roles of a possible subducting seamount, 2012, *J. Geophys. Res.*, 117, B05311, doi:10.1029/2011JB009124.
- 9) Mitsui, Y., Y. Iio, and Y. Fukahata, 2012, A scenario for the generation process of the 2011 Tohoku earthquake based on dynamic rupture simulation: Role of stress concentration and thermal fluid pressurization, *Earth Planets Space*, 64, 1177-1187.
- 10) Ide, S., A. Baltay, and G. C. Beroza, 2011, Shallow Dynamic Overshoot and Energetic Deep Rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 332, 1426-1429, doi: 10.1126/science.1207020.
- 11) Kozdon, J.E., and E. M. Dunham, 2013, Rupture to the trench: dynamic rupture simulations of the 11 March 2011 Tohoku earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 103, 1275-1289, doi: 10.1785/0120120136.
- 12) Ide, S., and H. Aochi, 2012, Historical seismicity and dynamic rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, in press.
- 13) Kimura, G. et al., 2012, Runaway slip to the trench due to rupture of highly pressurized megathrust beneath the middle trench slope: The tsunamigenesis of the 2011 Tohoku earthquake off the east coast of northern Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 339-340, 32-45.
- 14) McKenzie, D., and J. Jackson, 2012, Tsunami earthquake generation by the release of gravitational potential energy, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 345-348, 1-8.
- 15) Ma, S., 2012, A self-consistent mechanism for slow dynamic deformation and tsunami generation for earthquakes in the shallow subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L11310, doi:10.1029/2012GL051854.

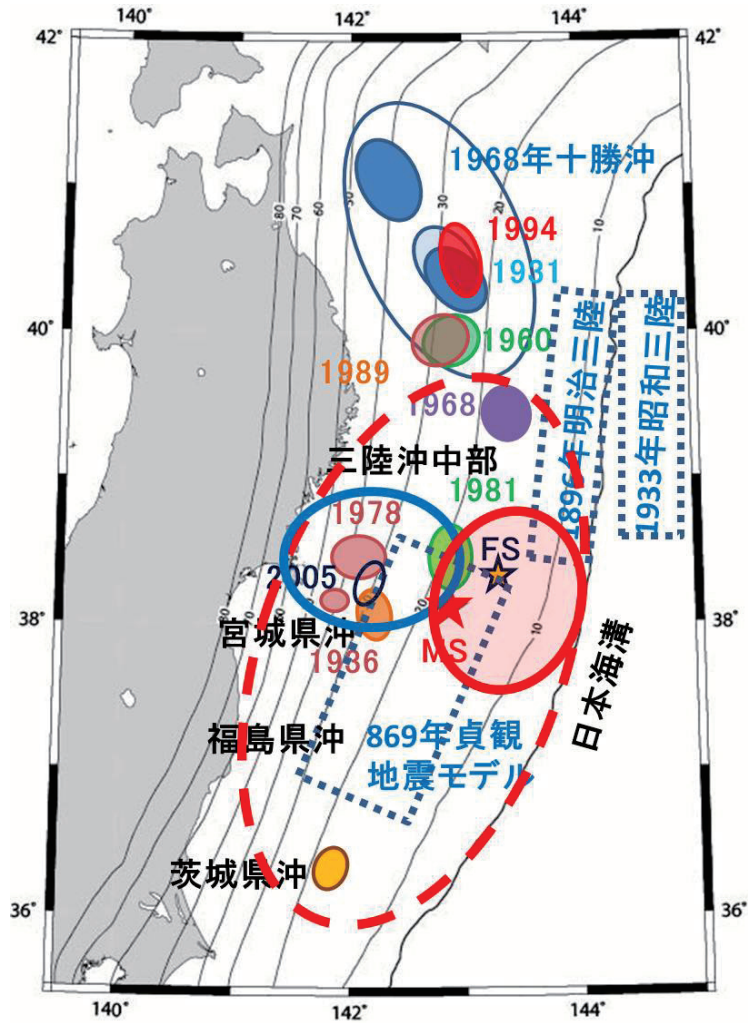


図1 東北沖 M7-8 クラスアスペリティと 2011 年東北地方太平洋沖地震震源域
 赤点線および赤線で囲まれた領域は震源域および特大すべり域を示す。FS および MS は 3 月 9 日の前震、および本震の震央を表す。論文¹⁾の図を改変。

Figure 1. Distribution of M7-8 class asperities and the rupture area of the 2011 Tohoku earthquake
 The areas enclosed by broken and bold red lines indicate the rupture and the especially large slip areas, respectively. FS and MS mean the 3/9 foreshock and the main shock, respectively. This is modified from the figure of the paper¹⁾.