12-2 エネルギー収支を考慮した地震発生シナリオ構築の新手法

A new method to generate rupture scenarios for megathrust earthquakes taking the energy balance into account

野田 朱美(気象庁気象研究所) NODA Akemi (Meteorological Research Institute)

高精度かつ高密度な GNSS 観測網の配備により、プレート境界の固着(すべり遅れ)の時空間変化を捉えることが可能になった。そして、すべり遅れの推定結果を活用して、将来発生する地震のモデル(地震シナリオ)を予測する研究が数多く行われている。その手法は大きく2種類、すなわち kinematic modeling と dynamic modeling に分類することができる。まず、kinematic modeling としては、すべり遅れ速度の推定結果に蓄積年数をかけて地震すべり分布をモデル化する方法がある^{例えばり)}。この手法は、簡単に地震シナリオ構築ができるという利点がある一方で、断層破壊の際の力学的プロセスとは必ずしも整合しないという問題がある。対照的に dynamic modeling では、摩擦構成則に従った動的破壊シミュレーションを通じてモデルが作成される。この際、応力降下量はすべり遅れ速度から計算されるせん断応力の蓄積に基づいて設定される (Mえばり)。この手法による地震シナリオは必ず断層の破壊力学と整合するが、自発的な断層破壊の時間発展をシミュレートするために計算負荷が大きいという特徴がある。特に、正確な推定が難しい摩擦パラメターに関して、パラメター探索のために多数のシミュレーションを実行する場合、この特徴はシナリオ構築の障害となる。

これらの問題を乗り越えるため、新たなシナリオ構築手法 energy-based method を提案する 3 . 本手法は従来の kinematic modeling と dynamic modeling の中間に位置し、これらの手法の弱点を補うことができる。シナリオ構築の手順は 2 段階で構成される。第 1 段階としてプレート間すべり遅れの推定結果を基に地震すべりモデル(シナリオ)を推定し、第 2 段階としてエネルギーバランスの観点からシナリオが断層の破壊力学と整合するか否かを判定する。

南海トラフプレート境界を例にとって、シナリオの構築手順を説明する。GNSS データ解析によるプレート間すべり遅れ速度分布(第1図 a)から、プレート境界のせん断応力の蓄積速度を計算できる(第1図 b). プレート境界の破壊挙動は、駆動力としてのせん断応力と抵抗力としての摩擦特性に規定されるという考えに基づき、すべり遅れではなくせん断応力から地震すべりモデルを推定する。せん断応力の蓄積速度の分布から、4つの応力蓄積のピーク(M: 室戸岬沖、Ki: 紀伊水道、Ku: 熊野灘、E: 遠州灘)が確認できる。これを震源域の最小単位「アスペリティ」と考え、地震は単独あるいは複数のアスペリティの組合せで発生するという仮定の下、10 通りの組合せのシナリオを作成した。第1図 (c) は、例として室戸岬沖と紀伊水道のアスペリティの組合せ M-Ki を選んだ場合の震源域を示す。せん断応力の蓄積速度が 0 Pa/yr 以上(応力増加)の領域を震源域として設定した。地震時の震源域内の応力降下量(第1図 c)は、せん断応力(第1図 b)が 150 年蓄積したものと仮定した。最後に、仮定した応力降下量を満たす地震すべりモデルをインバージョンで推定した(第1図 d). このモデルは静的なすべりモデルであるため、dynamic modeling よりも圧倒的に小さい計算負荷で計算することができる。アスペリティの様々な組合せについて同じ手順を適用して合計 10 個の地震シナリオを作成した(第2図).

次に、以上のように構築した各シナリオのエネルギーバランスを評価する。地震発生により解放

される地殻内の歪みエネルギー ΔW のうち,一部は断層面での摩擦により散逸し(E_D),残りは地震波の放射エネルギーに変換される 4). そこで,新たなパラメター residual energy E^{res} を以下のように定義する:

$$E^{res} = \Delta W - E_D \tag{1}$$

 E_D は ΔW の一部に過ぎないという関係から、residual energy が正の値になることが、地震発生の必要条件と考えることができる.この基準により断層の破壊力学と整合しないシナリオは排除される.

解放される歪みエネルギー ΔW は第 1 段階で作成したシナリオの応力降下量と地震すべりモデルから計算される。 散逸するエネルギー E_D に関しては,摩擦構成則や経験的なスケーリング則により与える必要がある。 ここでは,南海トラフで発生する地震の動的破壊シナリオを検討した Hok et al. $(2011)^{2}$ のすべり弱化則を用いて散逸するエネルギーを見積もった。 第 3 図のような線形のすべり弱化則の場合, residual energy は available energy と fracture energy の差として求めることができる.

作成した 10 個のシナリオの residual energy を求めた結果 (第2図), 5 個のシナリオが正の residual energy を示し、地震発生の必要条件を満たした.残りの 5 個のシナリオはエネルギーバランスの観点から実現しないと考えられる.主に室戸岬沖のアスペリティ M を含むシナリオが正の residual energy を示したが、これはアスペリティ M の応力蓄積速度が大きいことを反映している.

次に、時間の経過とともに各シナリオの residual energy がどのように変化するか調査した。第4図内の 10 本の曲線は、各シナリオの蓄積時間を変更して計算した residual energy を示している。蓄積時間 10 年から 200 年の間を 0.1 年間隔に分割し、合計 1901 ケースの residual energy を計算して各シナリオの曲線をプロットした。計算負荷が dynamic modeling よりも圧倒的に小さいため、このような連続的に見える評価が可能となる。蓄積時間 10 年の時点で、既に多くのシナリオで M_w 7クラスの地震となるほどの歪みエネルギーが蓄積されている。しかし、この時点では全てのシナリオが負の residual energy を示すため、地震発生の必要条件を満たさない。その後、residual energy は一旦減少するが、蓄積時間が 100 年を超えた頃より急激に増加して正の値を示すようになる。最終的に、すべてのシナリオが地震発生の必要条件を満たすようになった。このように、すべり遅れがあるだけでは地震は発生せず、断層面の摩擦で散逸するエネルギー以上の歪みエネルギーが蓄積して初めて地震が発生する。この点で、energy-based method は kinematic modeling と決定的に異なっている。

Residual energy の時間推移の特徴を掘り下げるために、蓄積時間に対する available energy と fracture energy の変化を第5図に分けて示す. Fracture energy は時間に比例して増加するのに対し、 available energy は時間の2乗に比例して増加する。そのため、最初の段階で available energy よりも fracture energy の方が大きくても、時間の経過によりいずれ必ず available energy が fracture energy を 上回り、residual energy が正の値に変わって地震発生の必要条件を満たすようになる.

ところで、第5図の fracture energy は、一般的なすべり量と fracture energy のスケーリング関係に簡単に焼き直すことができる。すなわち、fracture energy が蓄積時間の1乗に比例する場合には、震源全体の fracture energy の総和は地震モーメントの1乗に比例し、単位面積当たりの fracture energy は平均すべり量の1乗に比例する。これは、実際の地震データから推定された fracture energy の経験的スケーリング関係 (を調和的である。ただし、経験的スケーリング関係では、地震モーメントあるいはすべり量の指数は必ずしも1と一致しない。Fracture energy のスケーリング関係における地震モーメントあるいはすべり量の指数が2よりも小さければ、時間の経過によっ

て必ず available energy が fracture energy を上回り、地震発生の必要条件を満たすようになる、という本研究の結論は変わらない。しかし、指数が1からずれると第5図の破線(fracture energy)の傾きが変化し、地震発生の必要条件を満たすようになる時間が変わる。そのため、地震が発生するために必要な蓄積年数を考える上で、fracture energy の経験的スケーリング関係は非常に重要な情報である。

以上のように、energy-based method の理論的な枠組みを合理的に設定することができた。その一方で、シナリオ構築における具体的なモデル設定については改善の余地が残されている。Energy-based method のシナリオ構築には2つのモデル、応力蓄積分布のモデルと摩擦特性のモデルが必要となる。

応力蓄積分布は地震すべりモデルの空間分布や available energy の見積りに影響する. 今後, 海底 地殻変動観測の拡充によりすべり遅れ推定の空間解像度が向上することで, より高精度な応力蓄積 分布が得られることが期待される. また, 応力蓄積速度を一定と仮定するのではなく, episodic な スロー地震による応力の解放・蓄積も取り入れることで, より現実的なシナリオを構築できると考えられる.

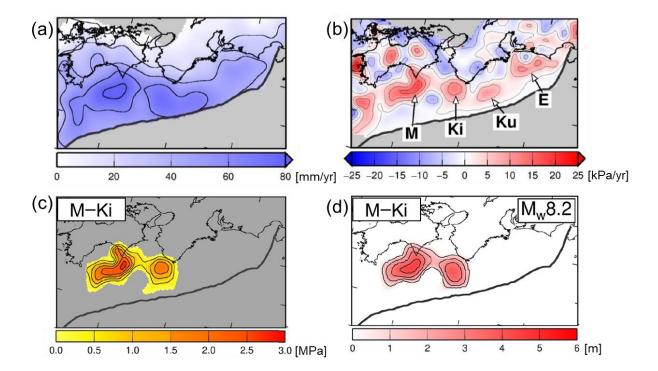
摩擦特性は fracture energy の見積りに影響し、そのスケーリング関係により地震発生までに必要な蓄積年数が変化する。本研究ではすべり弱化則を仮定して fracture energy を推定したが、実際の地震記録に基づくスケーリング関係を使った方が、より安定的な推定が可能になると考えられる。なぜなら、地震波データからすべり弱化の各パラメターを推定しようとすると、強度超過と臨界すべり量の間にトレードオフが生じ、個別のパラメターを精度よく推定することは難しいことが分かっているためである 7,8%.

Energy-based method の枠組みの下、新たな観測データから得られる情報を取り込んで応力蓄積分布と摩擦特性のモデルを更新することで、シナリオをより現実的なものに改良していくことができる。このような柔軟性を備えていることが、energy-based method の利点の1つである。

(野田 朱美) NODA Akemi

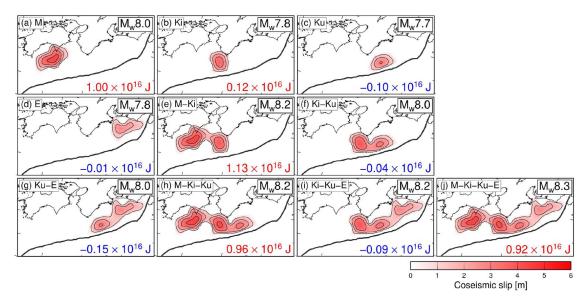
参考文献

- 1) Baranes et al. (2018), Geophysical Research Letters, 45, 2986–2994. https://doi.org/10.1002/2018gl077329
- 2) Hok et al. (2011), Journal of Geophysical Research, 116, B12319. https://doi.org/10.1029/2011jb008492
- 3) Noda et al. (2021), *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **126**, e2020JB020417. https://doi.org/10.1029/2020JB020417
- 4) Kostrov (1974), Izvestiya, Earth Physics, 1, 23-40.
- 5) Abercrombie & Rice (2005), *Geophysical Journal International*, **162**, 406–424. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2005.02579.x
- 6) Tinti et al. (2005), Journal of Geophysical Research, 110, B12303. https://doi.org/10.1029/2005jb003644
- 7) Guatteri & Spudich (2000), *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90(1)**, 98–116. https://doi.org/10.1785/0119990053
- 8) Kimura et al. (2010), *Journal of Geophysical Research*, **115**, B08302. https://doi.org/10.1029/2009jb006758



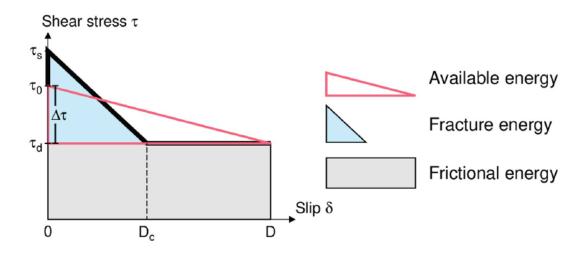
第1図 南海トラフプレート境界を対象としたシナリオ構築の手順 3 . (a) GNSS データ解析によるプレート間すべり遅れ速度分布. (b) プレート境界のせん断応力の変化速度. 4 つのアスペリティ M(室戸岬沖),Ki(紀伊水道),Ku(熊野灘),E(遠州灘)の位置を白いベクトルで示す. (c) 蓄積時間 150 年を仮定した場合のシナリオ M-Ki の応力降下量. 灰色の領域は震源域の外側であることを示す. (d) (c) から推定したシナリオ M-Ki のすべり量分布. 右上にモーメントマグニチュードを示す.

Fig. 1 Procedure for generating an earthquake scenario in the Nankai trough subduction zone³⁾. (a) Interplate slip-deficit rate distribution estimated from interseismic GNSS observation. (b) Distribution of shear stress change rate at the plate interface. The locations of four asperities, M (off Cape Muroto), Ki (the Kii channel), Ku (the Kumano-nada Sea), and E (the Enshu-nada Sea), are indicated by white arrows. (c) Stress drop distribution for scenario M-Ki assuming an accumulation time of 150 years. Gray areas show regions outside the source region. (d) Slip distribution of scenario M-Ki estimated from (c). The moment magnitude is shown in the upper right of each panel.



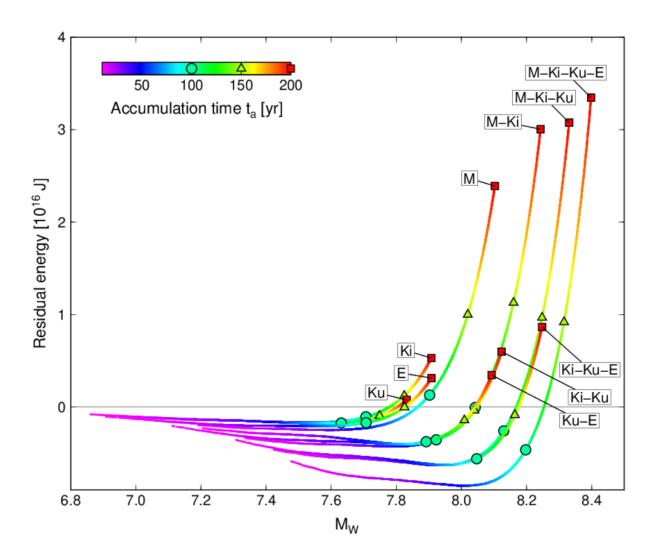
第2図 蓄積時間 150 年を仮定した場合の地震シナリオのすべり分布 ³⁾. コンターはすべり量を 1m 間隔で示している. モーメントマグニチュードを右上に, residual energy を右下に示す (赤文字:正の residual energy,青文字:負の residual energy).

Fig. 2 Slip distributions of scenarios assuming an accumulation time of 150 years³⁾. The contours indicate slip at intervals of 1 m. The moment magnitude is shown in the upper right of each panel. The residual energy is shown in the lower right of each panel (red: positive, blue: negative).



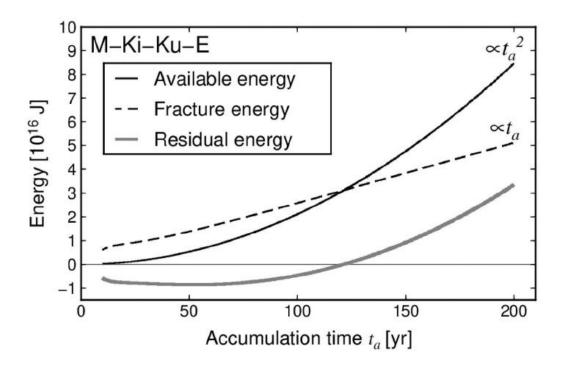
第3図 線形のすべり弱化則におけるエネルギーパーティショニングの概念図 3 . τ_0 は初期応力, τ_s と τ_a は静摩擦応力と動摩擦応力, Δ τ は応力降下量, Dは最終すべり量, D_s は臨界すべり量をそれぞれ示している.

Fig. 3 Schematic figure of the energy partitioning in a unit area of a rupture fault for a linear slip-weakening friction law. $^{3)}$ τ_{0} is the initial shear stress. τ_{s} and τ_{d} are the static and dynamic frictional stresses, respectively. $\Delta \tau_{0}$ is the stress drop. D is the final slip. D_{c} is the critical slip distance.



第4図 10個の地震シナリオにおける residual energy の時間推移. 各シナリオの residual energy を色つきの線で示し, 線の色で蓄積時間を表している. 丸, 三角, 四角はそれぞれ蓄積時間 100, 150, 200 年に対応する.

Fig. 4 Temporal evolution of residual energy for 10 scenarios. Temporal changes in the residual energy of scenarios are shown by colored lines, with color variation denoting the assumed accumulation time. Circles, triangles, and squares indicate the residual energy for accumulation times of 100, 150, and 200 years, respectively.



第 5 図 シナリオ M-Ki-Ku-E における available energy, fracture energy, residual energy の蓄積時間に対する変化 3).

Fig. 5 Changes in available, fracture, and residual energy with accumulation time for scenario M-Ki-Ku-E.³⁾