

西南日本のメガスラスト地震サイクルにおける内陸断層の
クローン応力変化に基づく地震活動シミュレーション
Earthquake Simulation Using Coulomb Stress Change on Inland Faults
during the Megathrust Earthquake Cycle in Southwest Japan

○水戸川司・西村卓也

○Tsukasa MITOGAWA, Takuya NISHIMURA

In southwest Japan, it has been pointed out that the stress changes due to megathrust earthquakes may modulate the shallow crustal seismicity in the continental plate. We used the results of the block fault model estimated from geodetic crustal movement data to simulate the inland earthquake activity during the periodic megathrust earthquake cycles based on Coulomb stress changes. Our simulation suggests that the possibility of cascading rupture of the Median Tectonic Line fault system in Shikoku increased several decades before the megathrust earthquake.

1. はじめに

西南日本では、南海トラフ沿いでの海溝型巨大地震（以降、メガスラスト地震）が約 100 から 200 年周期で発生し、この巨大地震の 50 年前から 10 年後にかけて内陸地震が活発化する傾向が指摘されている（例えば、Utsu 1974; Hori and Oike, 1996）。このような傾向は、メガスラスト地震による準静的な応力変化が原因であると考えられ、クローン破壊応力変化（ ΔCFS ）を用いて内陸断層がメガスラスト地震サイクルから受ける影響を定量的に評価する研究が行われてきた（例えば、Hori and Oike, 1999; Shikakura et al., 2014）。本研究では、測地学的な知見に基づく断層ジオメトリや断層間の相対運動速度を使用し、周期的なメガスラスト地震サイクル中の内陸地震について ΔCFS に基づくシミュレーションを行った。測地学的な知見を考慮するために陸上 GNSS だけでなく海底地殻変動データを用いて詳細なメガスラスト断層の固着分布を推定した Nishimura et al. (2018) のブロック断層モデルの結果を使用した。シミュレーションに用いるパラメータのうち、見かけの摩擦係数と内陸断層の固着率の影響を調べ、過去の地震活動を再現できるモデルを構築する。構築したモデルから、規模ごとの内陸地震活動の時間変化の傾向を明らかにした。

2. 地震シミュレーションの手法

クローン破壊応力変化（ ΔCFS ）は、次の式で定義される。

$$\Delta CFS = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma_n \quad (1)$$

ここで、 $\Delta \tau$ と $\Delta \sigma_n$ は受け手の断層の剪断応力変化と法線応力変化、 μ' は見かけの摩擦係数である（ただし、法線応力変化は引張方向を正とする）。 μ' は断層物質そのものの摩擦係数でなく間隙水圧や断層帯の物性を含めた値である（Harris, 1998）。

媒質は弾性-半無限粘弾性水平二層構造を仮定し、計算には Fukahata and Matsu'ura (2006) のコードを使用した。ただし、断層面上は特異点となり、特に弾性応答の計算は計算コスト的に困難であるため、断層面上の弾性応答のみは半無限弾性体を仮定し、Okada (1992) のコードを使用して計算した。したがって、弾性層と粘弾性層の密度、剛性率、体積弾性率を揃えて、それぞれ $3.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、40.0 GPa、58.4 GPa とした。粘弾性層の粘性率は $1.0 \times 10^{19} \text{ Pa s}$ とし、この時のマクスウェル緩和時間は約 8 年である。

断層形状は、Nishimura et al. (2018) の断層モデルを使用するが、内陸のブロック間断層については、周囲の主要活断層（地震調査研究推進本部, 2020）の長さを参考に分割し、周囲に主要活断層が存在しない場合は 50 km 程度に等分した（図 1 の左）。また、全ての内陸断層は深さが 0.5 km から 15.5 km で一律とした。内陸断層の計算点は、周囲の内陸断層からの影響の過小評価を避けるために、断層中心だけでなく、断層面上に等間隔で 9 つの計算点を設けた。

応力源は、メガスラスト断層での固着とすべり

(地震), 内陸断層での固着とすべり(地震)を考慮した. メガスラスト断層の固着は Nishimura et al. (2018) で推定されたバックスリップ速度のうち, 標準誤差が 20 mm/yr 以上かつ豊後水道の長期的 SSE の領域を除外してバックスリップとして与えた. メガスラスト地震は, 1361 年正平地震以降の平均再来間隔である~117 年を参考に固定周期 120 年で発生させた. 内陸断層での固着は内陸断層面に一様なバックスリップ速度を与えることで考慮する. バックスリップ速度には, ブロック間相対運動速度 (Nishimura et al., 2018) を使用するが, ブロック断層モデルでは周辺の複数の断層変位が 1 つのブロック境界断層の変位に簡略化されている場合がある. さらに, 測地的に観測されるブロック間相対運動には, 地震によって解消されない非弾性的な変形も含まれていると考えられる. したがって, バックスリップ速度はブロック間相対運動速度に固着率を乗じたものを与えた. この内陸断層の固着率は全内陸断層に一律で与え, 0.05 から 0.2 の 4 パターンのモデルを構築した. 内陸断層でのすべりは, 断層強度を仮定し, 各断層の 9 つの計算点のうち 1 点でも CFS が断層強度を超えた時に CFS が 0 に戻るように断層面全体に一様なすべりを与えた. 断層強度は, 地震モーメントと断層面の平均滑り量の経験式 (Somerville et al., 1999) を使用して各断層の地震時平均滑り量を算出し, 断層面に一様なすべりとして与えた時の各計算点での応力降下量を断層強度とした. 断層強度は地震発生ごとに 20% の摂動を与えた.

以上の条件で, メガスラスト地震や他の内陸地震との同時発生や誘発を考慮し, シミュレーションの時間ステップを 1 年として, 全ての内陸断層で 1000 回の地震が発生するまで計算を行った.

3. 結果と議論

ここでは, 内陸地震の発生時期についてメガスラスト地震からの経過時間に着目するために, メガスラスト地震時から 10 年ごとの地震数を全地震数で割ったものを地震発生割合と定義した. 様々な見かけの摩擦係数と内陸断層の固着率を使用した場合, 地震発生割合がどのように変化するかを調べた.

見かけの摩擦係数は 0 から 0.4 へと大きくなるほどメガスラスト地震から 10 年後までの地震発生割合が大きくなった. これは, 西南日本の法線応力変化が正であることに起因すると考えられる. 次に, 固着率は 0.05 の場合にメガスラスト地震前後に活発化し, 0.20 へと大きくなるにつれて活発化傾向が小さくなった. これは, 固着率が大きくなると, 応力載荷速度が大きくなり, 相対的にメガスラスト地震サイクルの影響が小さくなることに起因すると考えられる. 過去の実際の内陸地震活動と比較した場合, 見かけの摩擦係数と内陸断層の固着率は 0 と 0.10 で最もよく実際の地震活動を再現できた.

最後に, 内陸地震の規模ごとに地震発生割合を調べた (図 1 の右). M_w が 7.2 以上の地震はメガスラスト地震の数十年前からの活動が顕著であり (図 1 の右), これらの地震のほとんどは四国中央構造線での連動破壊であることが分かった. 四国中央構造線で 1605 年慶長地震の 9 年前に 1596 年 9 月 1 日から 5 日にかけて連鎖的に破壊した可能性が指摘されており (岡田, 2006), シミュレーションの結果と調和的である. このような測地的な知見も考慮した地震発生シミュレーションの結果は, 今後の内陸地震の長期的な評価にも新たな知見として考慮する必要があると考える.

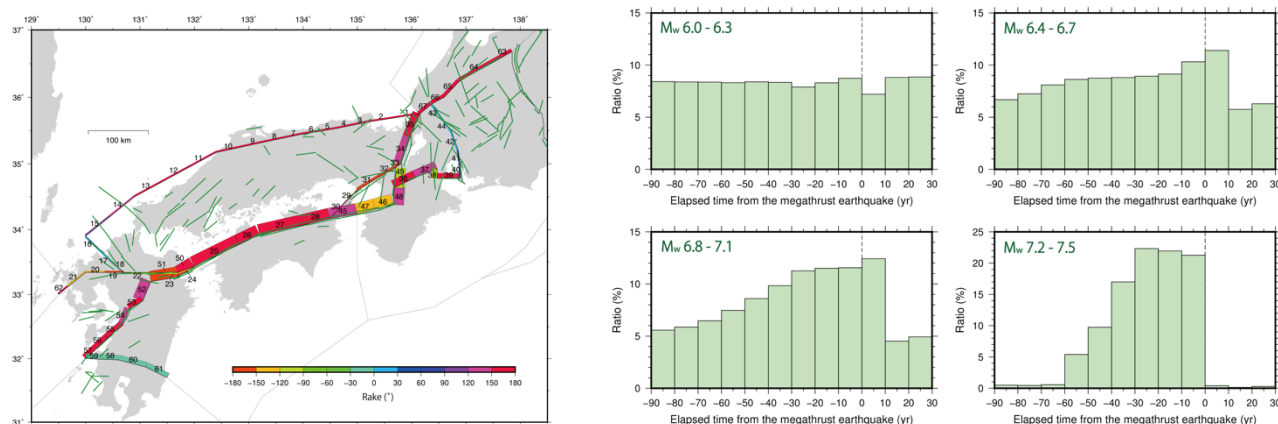


図 1. 内陸断層モデル (左) と内陸地震の規模ごとの地震発生割合 (右).