

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  
クーロン応力変化に基づく地震活動シミュレーション

水戸川 司

1. 序論

西南日本では、南海トラフにおいて沈み込むフィリピン海プレートとアムール（ユーラシア）プレートの境界で M8 クラスの巨大地震（南海トラフ巨大地震；以降、メガスラスト地震と呼ぶ）が約 100-200 年周期で発生することが知られている。この地域は世界的に見ても歴史地震に関する資料が豊富であり、過去のメガスラスト地震の約 50 年前から 10 年後にかけて M6.5 以上の内陸地震活動が活発であることが示され、このような期間は「内陸地震の活動期」と呼ばれている。西南日本のように、その地域を代表する断層での大地震が長期間に渡ってその周辺地震活動に影響を与えるような傾向は、米国カリフォルニア州サンフランシスコ湾岸地域でも観測されている。多くの先行研究では、観測された地震活動の時間変化を説明するための指標としてクーロン破壊応力変化 ( $\Delta CFS$ ) が使用され、その有効性が実証されてきた。本研究は、粘弾性を考慮した  $\Delta CFS$  を用いて西南日本におけるメガスラスト地震サイクル中の内陸地震活動の活動時期を再現するモデルを構築し、地域や断層タイプごとにモデルから予測される内陸地震の活動時期の傾向について調査することを目的とする。構築した西南日本の地震活動モデルでは、メガスラスト地震サイクル中の内陸地震活動だけでなく、近年の測地学的観測によって明らかとなった詳細なメガスラスト断層の固着分布や内陸のテクトニックな変形場も考慮した。

2. 二次元モデルによる西南日本の内陸断層の活動期

南海トラフ沿いのメガスラスト地震サイクルを模した 2 次元モデルを用いてメガスラスト断層から内陸断層までの距離に対する内陸地震発生可能時期（以降、活発期間と呼ぶ）の一般的な傾向と、西南日本の主要活断層に対して内陸地震が発生可能であると考えられる時期について調査した。その結果、メガスラスト断層下端から水平方向に約 40-290 km 離れた位置にある逆断層は、走向・傾斜によらずほとんどがメガスラスト地震時の  $\Delta CFS$  は負となり、メガスラスト地震前に活発化する傾向があることや、横ずれ断層は走向の違いによって地震時  $\Delta CFS$  の極性が変化しやすい傾向が得られた。さらに、地震時  $\Delta CFS$  が

負となる横ずれ断層において、粘弾性緩和の影響を調べるために純粋な弾性体の場合の活発期間を比較すると、メガスラスト断層からの距離によって活発期間が長くなったり短くなったりすることが分かった。また、西南日本の主要活断層に対する結果は、見かけの摩擦係数が0.1より大きいと地震時 $\Delta$ CFSの極性が正で、0.1以下で負となる右横ずれ断層が存在することを示した。これらの断層の中に歴史時代にメガスラスト地震前の数十年間で破壊したものが存在することは、見かけの摩擦係数が0.1以下であることを示唆する。さらに、主要活断層に一律で与える内陸断層固有の応力载荷速度として測地学的ひずみ速度と同程度の5.0 kPa/yearを与えると、ほとんどの主要活断層はメガスラスト地震サイクル中のいつでも内陸地震が発生できることを示した。一方で、地質・地震学的ひずみ速度と同程度の応力载荷速度(1.0 kPa/year)を与えた場合、内陸地震の発生可能時期が調整され、「内陸地震の活動期」の傾向が得られた。このように、西南日本において歴史時代の地震と整合させるために低い見かけの摩擦係数や地質・地震学的ひずみ速度と同程度の応力载荷速度が必要なことは、先行研究と調和的である。さらに、特定の断層に対して $\Delta$ CFSの速度からメガスラスト地震1サイクル中の地震発生数の割合を計算すると、地震後の粘弾性緩和の影響によって活発期間内でも地震発生数の割合が次のメガスラスト地震に向けて徐々に増加したり減少したりすることが分かった。また、地震時 $\Delta$ CFSが正でメガスラスト地震サイクル中のいつでも地震が発生できるような内陸断層でも、粘弾性緩和の影響によって地震直後の発生割合が高くなるものが存在することがわかった。

### 3. ブロック断層モデルに基づく内陸地震シミュレーション

測地学的データに基づくメガスラスト断層の固着・すべり分布、内陸断層のジオメトリ及びすべり速度を用いて西南日本の内陸地震活動の時間変化を再現する内陸地震シミュレーションモデルを構築した。その結果、メガスラスト地震時に誘発される内陸地震が非常に多く、歴史時代に見られる地震後10年間に渡る内陸地震の活発化傾向は再現できなかった。地震後の活発化を説明するためには、シミュレーションでは考慮しなかったメガスラスト地震後の余効すべりや間隙流体圧上昇に伴う強度の低下、速度・状態依存摩擦則から導かれる遅れ破壊のようなメカニズムが作用していると考えられる。シミュレーションにおいて、九州の大部分を除く西南日本の断層群の地震間10年ごとの地震発生割合を実際の内陸地震活動に整合させるためには、内陸断層の見かけの摩擦係数が0.1以下、粘弾性層の粘性率が $1.00\text{--}2.00 \times 10^{19}$  Pa s、GNSSから推定された断層のすべり速度に対する地震として解放されるすべり速度の割合である固着率が0.05-0.10程度であることが必要である。地域ごとの断層群に対してシミュレーションが予測する内陸地震の活動傾向を調べると、四国地方の中央構造線断層帯や、山陰ひずみ集中帯の成因と考えられる伏在的な内陸断層群では、メガスラスト地震後に静穏化する傾向があることが分かった。

一方で、九州南部の熊本周辺の断層群ではメガスラスト地震サイクルによって内陸地震の活動時期はほとんど影響を受けていない。また、近畿地方の断層群は複数のタイプの活動傾向の断層が存在しており、地震後 10 年程度発生割合が大きく、地震の数十年前から発生割合が漸増する傾向が見られたが明確な静穏期は得られなかった。さらに、西南日本全域の地震活動の時間変化について規模ごとに見ると、 $M_w6.4$  以下の地震はメガスラスト地震サイクル中の発生時期はほとんど変化せず、 $M_w7.2$  以上の地震は地震前約 60 年から急激に活発化する傾向が得られた。すなわち、構築したシミュレーションモデルによると、次のメガスラスト地震の数十年前から、四国、山陰、近畿地方などで内陸地震が増加し、大規模な内陸地震も発生しやすくなる傾向が予測される。本研究のようなシミュレーションモデルは 1946 年昭和南海地震から 74 年が経過した現在における今後の地震防災においても考慮すべき重要な知見を提供すると考えられる。

#### 4. 議論

本研究では、西南日本においてメガスラスト地震サイクル中の長期的な内陸地震活動の傾向を先行研究と同様に低い見かけの摩擦係数 0-0.1 とした場合に説明できた。つまり、本研究で考慮したような活動期傾向を持つ比較的大規模な断層での地震は、間隙流体圧の上昇に伴う急激な強度の低下ではなく、長期的に低い見かけの摩擦係数を保っていて、テクトニックな応力蓄積によって発生するものが支配的であることを示している。

ブロック断層モデルに基づく内陸地震シミュレーションで得られた内陸断層の固着率 0.05 から 0.10 程度は、ブロック間相対運動速度に対して活動期を説明するために必要な単一の内陸断層のすべり速度の割合である。小さな固着率の原因として、測地的に観測される変形のほとんどが非弾性変形（非地震性すべりなど）や主要活断層の周辺に多く存在する小断層でのすべりによって解消されているということで説明できる。前者は、歴史地震の累積地震モーメントから考えても、妥当な考え方であると思われる。ただし、非弾性変形として解消される変形を定量的に示すことはできていない。後者は、跡津川断層周辺で小断層によるすべり速度が周辺の単一の大断層に匹敵する可能性が示唆されていることから、小さな固着率に比較的大きく寄与していると考えられる。さらに、小断層の調査範囲や露頭状態などの限界によって全断層が調査できてない可能性を考えると、小断層の影響はさらに大きいかもしれない。小断層でのすべりには地震性だけでなく、非地震性のすべりも存在すると考えられるので、非弾性すべりについては前者の非弾性変形メカニズムの一部として考えることができるが、これら以外にも複数の未知のメカニズムが働いているかもしれない。

本研究では、粘弾性を考慮することで弾性モデルでは再現できなかった活動期中の地震活動の時間変

化を再現することに成功した。一方で、使用した粘弾性構造は水平二層構造であり、沈み込んだ海洋プレートの構造は考慮されていない。粘弾性は地震活動にも大きく影響することが示唆されたため、今後は詳細な粘弾性構造を導入する必要があると考えられる。

## 5. 結論

本研究では、西南日本におけるメガスラスト地震サイクル中の内陸地震活動の時間変化の理解を深めるために、粘弾性を考慮した $\Delta$ CFSに基づいてメガスラスト地震サイクルが内陸地震の発生時期についてどのような影響を与えるかを調査した。

長期的なメガスラスト地震サイクル中の内陸地震活動に着目した本研究及び先行研究において示唆される低い見かけの摩擦係数 0-0.1 は、断層が長期的に低い見かけの摩擦係数を保っていることを示し、西南日本で発生する内陸地震は、間隙水圧の上昇に伴う急激な強度の低下ではなく、テクトニックな応力蓄積によって発生するものが支配的であることを示唆する。また、ブロック断層モデルの結果を用いた場合、内陸断層でのメガスラスト断層の固着に伴う弾性変形を除いた測地学的観測のすべり速度の $\sim$ 5-10%のすべり速度でなければ、西南日本における活動期傾向を説明できなかった。測地学的観測と比較した時の個々の内陸断層小さなすべり速度の全ての原因を特定することはできないが、測地学的に観測される変形のほとんどが非弾性的に解消されることや、小断層でのすべりによって解消されているということが考えられる。さらに、粘弾性の影響により、CFSに基づいた活発期間の中でも発生割合は時間変化し、歴史時代の地震活動の傾向からもこのような影響を考慮することは長期的な内陸地震の活動時期を調査する上で重要であることが示唆された。

内陸地震を長期的に評価する上で、過去に発生した地震活動の傾向を調べることは最も簡便な方法である。しかし、内陸地震の再来間隔が約千年から数万年であることに対し、地震発生日を特定出来るような歴史記録は、世界的にも豊富な記録が残る西南日本でさえ過去千年程度しか残っていない。一方で、本研究のような数値シミュレーションを行うことでより長期間のメガスラスト地震サイクル中の地震活動の傾向を調べることができ、このような情報は内陸地震の長期的な評価に対しても重要な知見の一つであると考えられる。構築したシミュレーションモデルから、次のメガスラスト地震の数十年前から、四国、山陰、近畿地方などで内陸地震が増加し、大規模な内陸地震が発生しやすくなる傾向が予測され、特に四国中央構造線の連鎖的な破壊の可能性も高まっている。つまり、1946年昭和南海地震から74年が経過した現在では次なる南海トラフ巨大地震だけでなく、内陸大地震が発生しやすくなることが予測される。このようなシミュレーションの結果は、今後の地震防災においても考慮すべき重要な知見を提供すると考えられる。