

博士論文 要約

Large-Scale Quasi-Dynamic Earthquake Cycle Simulations
with Hierarchical Matrices Method

H 行列法を適用した大規模準動的地震発生サイクルシミュレーション

大谷真紀子

1. 序論

近年、陸上・海上の観測システムの充実により、沈み込むプレート境界上で多様な時空間スケールを持つすべり現象が観測されている。プレート境界上に生起する巨大地震を含めた多様なすべり現象の相互作用機構を解明し、巨大地震の発生予測に繋げることを目的として、地震発生サイクルシミュレーション(ECS: Earthquake Cycle Simulation)が行われている。本論文では、南海トラフ等実際の巨大地震発生領域を対象にした大規模 ECS の実施を可能にする、効率的な三次元準動的 ECS 計算手法の高度化を行った。

ECS の実施には、その計算量が大きな問題となる。ECS では計算量の比較的小さな境界要素法を用い、慣性の項を近似した準動的スキームを適用することが多い。プレート境界面を計算領域として N 個のセルに離散化し、各セル上で摩擦則と運動方程式を連立させて数値的に解くことですべりの時間発展を得る。計算量は $O(N^2)$ である。摩擦パラメータに依存した小さなセルサイズを設定する必要があり、実際の巨大地震を対象に様々な時空間スケールを持つすべり現象をモデル化する為には、さらに大きな N を扱うことのできる計算高速化手法が必要となる。

一方、境界要素法準動的スキームを用いることは、単純化したモデルを扱うことを意味する。境界要素法を用いる際には媒質の情報はすべり応答関数に集約され、三次元問題においてこの理論解が存在する全無限・半無限均質媒質のみしか扱えない。また、これまで行われてきた準動的スキームによる ECS では動的効果は近似され、通常、すべり・応力変化は沈み込み方向の成分のみ考えられてきた。これらの単純化が ECS に及ぼす効果はこれまで調べられておらず、評価する必要がある。本論文では形状の効果に着目し、これまでの準動的 ECS では考慮されてこなかった、地表面形状及び非平面断層を扱う際に重要となる垂直応力の時間変化を導入し、その効果を検証した。

2. H 行列法を適用した準動的地震発生サイクルシミュレーション

本論文ではまず、H 行列法(Hierarchical Matrices Method)を導入することで準動的 ECS 計算の高速化を行った。H 行列法とは、対角部分に大きな値を持ち外側に行くに従って小さな値を持つ密行列を、階層的に分割し、分割した各小行列において低ランク近似を行う密行列圧縮手法である。本手法の導入により、メモリ量・計算量を $O(N^2)$

から $O(N) \sim (M \log N)$ へと削減することに成功した。

この計算手法を用いて、超巨大地震である 2011 年東北地方太平洋沖地震の階層的な破壊エネルギー分布及び強固着域を持つ地震サイクルモデルを構築し、数百年の再来間隔を持つマグニチュード (M) 9 地震及びその破壊領域内で 20~40 年の再来間隔で繰り返し発生する M7 級の地震の両方を再現した。また、本モデルにより M9 地震発生前に観測された福島沖でのプレート間固着のはがれを説明することができた。この固着のはがれは複数回発生する可能性があり、必ずしも直後の巨大地震発生を示す物ではないことを示した。

3. 準動的地震発生サイクルにおける地表面形状の効果

次に、任意の地表面形状下でのすべり応答関数を数値的に求める効率的手法を開発し、それを用いた ECS を行った。すなわち、各断層セルに対して異なるサイズの地表面セルを設定することで、効率的に精度良く求めることを可能にした。平坦な地表面と比べて、地表面から断層までの距離が変化することによる断層スティッフネスの変化が見られ、これは浅い断層セルにおいて顕著であり、時にすべりの様式を変化させる。また、本論文で開発した任意の地表面形状に対する ECS は、異なる海溝深さを持つ複数のプレートを扱う列島規模の地震サイクルモデルの構築を可能にする。本論文ではこの方法を用いて試験的に、フィリピン海プレート及び太平洋プレートの両者を同時に扱い、東北地方太平洋沖地震および南海・東南海・東海地震をモデル領域に含む列島規模地震サイクルモデルを構築した。その結果、東北地方太平洋沖地震サイクルは、弾性媒質中において南海・東南海・東海地震の発生サイクルに影響を与えないことが分かった。

4. 垂直応力変化を考慮した準動的地震発生サイクル

次に、非平面断層で重要となる垂直応力の時間変化を導入し、プレート境界で沈み込む海山・海嶺列の地震発生サイクルに及ぼす効果を検証した。東海地方では高さ数 km の海嶺列が沈み込む様子が確認されているが、このような沈み込む海嶺列では地震間に凸・凹部分で垂直応力が増加・減少し縞構造を示す。その結果、凹部分を中心に非地震性すべりが繰り返し発生する場合が得られた。浜名湖下で観測される長期的スロースリップは海嶺列の凹部分に位置し、形状がそのスロースリップの発生に影響を及ぼしている可能性を示している。

5. 南西日本南海トラフ沿いで発生する巨大地震：形状の効果

最後に、南海トラフで発生する南海・東南海・東海地震の単純なモデルを構築し、上

記で開発した方法を用いて、地表面形状を導入した場合および垂直応力変化を考慮した場合のサイクルの変化について検証した。考慮した地表面形状は上に凸であり、この場合には海溝軸を地表面とする平坦な地表を仮定した場合に較べて、浅い部分でプレート間固着が弱まり、再来間隔が減少した。また、プレート形状として数十 km スケールの凹凸を考慮した場合に、垂直応力が増加することによるすべりの様相の変化は見られなかった。

6. 結論及び今後の展望

以上、本論文では実際の巨大地震発生領域を対象とした大規模 ECS を実現することを目的に、H 行列法を適用して準動的 ECS 計算の省メモリ化・高速化を実現し、まず、2011 年東北地方太平洋沖地震（M9）といった超巨大地震サイクルモデルを構築した。さらに、この H 行列法を適用して、これまで考慮されていなかった形状の効果を導入した。地表面形状・プレート境界の色々なスケールの起伏形状による法線応力変化を ECS に導入したところ、すべりの様相が変化する場合があり、これらの効果を考慮すべきであるという結論を得た。

形状の効果の他にも、粘弾性媒質や動的効果は地震発生サイクルに影響を及ぼすことが分かっており今後考慮すべき課題として残る。これらの導入の際にも H 行列法は空間方向の圧縮に有効であると考えられ、H 行列法を用いたより現実的な地震発生サイクルシミュレーションが期待される。