

# 論文審査の結果の要旨

氏名 佐藤 大祐

震源の物理に基づく地震発生シミュレーションは、計算科学と地球科学の発展に伴い、大地震の動的破壊過程、余効滑り、長期载荷下で繰り返す地震のサイクル、深部スロースリップ、微動など多様な時間と空間スケールの地震現象を再現可能になってきた。今後、計算出力として得られる断層上の応力と摩擦強度の時空間分布が、現在の断層固着状態や将来の地震活動などを震源の物理の観点から議論するための基本データとなることが期待される。本論文では、地震発生モデルを構築する際に依拠する震源物理学の2つの基本要素、弾性体力学数値計算と岩石摩擦則において、研究進展を阻む既存の問題点の解決を目指す。ここで提案された弾性体力学の効率的な数値計算法、および、岩石摩擦則の改良された状態発展則は、従来の問題点を解決し得る画期的なものであり、多様な地震現象の物理機構の理解を進める上で今後重要な貢献を果たすものとして評価される。

本論文は5章からなる。第1章はイントロダクションである。地震発生モデルの数値計算に広く用いられる「時空間境界要素法 (ST-BIEM)」、および断層モデルにおいて地震発生の境界条件を記述する「速度と状態に依存する摩擦則 (RSF 則)」についてレビューを行い、今後の課題および本論文の位置づけが述べられる。

第2章は、ST-BIEM の計算コスト問題の解決に取り組んだ。ST-BIEM は、複雑な断層形状のモデル化と断層周辺の応力特異性の高い計算精度から広く使用されているが、モデル自由度 (空間要素数  $N$ 、および時間ステップ数  $M$ ) に対して、計算コストは  $O(N^2M)$  で増大する欠点がある。ここでは最良の数値コスト  $O(N)$  への低減を目指して新たな数値計算アルゴリズム  $FDP=H$  行列法を提案した。従来的高速領域分割法 (FDPM) を基礎とし、更に低ランク近似法 (H 行列法) を組み合わせることで計算コスト低減を図る。従来、静的問題のコスト解決に有効であった H 行列法は、動的問題には適用困難であった。ここで応力核関数を波線座標で評価し、動的問題において適用可能にした点は独自性が高く評価できる。単純な二次元断層モデルシミュレーションにおいて  $FDP=H$  行列法を実装し、 $N \sim 50-2000$  の範囲で数値コストがほぼ  $O(N)$  にスケールすることを示した。今後、本手法なしでは実行可能できない自由度 ( $N \sim 10^8$ ) を持つ大規模シミュレーションへの適用が期待される。

第3章は、RSF 則の改良された状態発展則を提案する。RSF 則は、岩石摩擦実験において低いすべり速度 ( $< \text{mm/s}$ ) で見いだされてきた摩擦の性質である。実験を再現する方程式は、速度依存の直接効果を担う「構成則」と、摩擦状態の時間発展を記述する「状態発展則」から構成される。これまで提案された複数の状態発展則はいずれも、速度ステップ試験とスライドホールドスライド試験の異なる2つの試験結果を調和的に再現することができず、シミュレーションに用いた場合に実験結果に依拠しない偽の結果をもたら

す致命的な欠点が残る。ここでは、先行研究における状態発展則修正の議論に立ち戻り、そこで提案された「Composite law」の表現式に依拠し、そこに残る欠点を独自に考察した。その克服は、導入された追加項を速度ではなく「速度と状態の積」に依存させて定常状態から大きく下方に乖離している場合にだけ有効とすることで一般に可能であることを示した。これより「修正 composite law」を提案し、実験の調和的再現により適していることを示した。

第4章と第5章は議論とまとめであり、FDP=H行列法と修正 composite law を用いた、今後達成すべき現実的な地震発生シミュレーションの展望について複数提案している。

以上のように、論文提出者が弾性体力学数値計算と岩石摩擦則の両面において実施した研究は、現実的な断層モデル構築に必要となる自由度に対して計算コストの制限を撤廃し、岩石摩擦の振る舞いを正しくシミュレーションモデルに含めることを可能にした。これは、今後の地震発生シミュレーションを用いた多様な地震現象の理解に大きな進展をもたらす優れた業績であると判断される。

なお、本論文は、指導教員である安藤亮輔准教授との共同研究であるが、論文提出者が主体となって数値計算アルゴリズムの発案、実装、コスト検証、および改良された状態発展則の発案、検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であったと判断する。その証拠として、第2章、および第3章の内容は、論文提出者を筆頭著者とした論文がそれぞれ公表を予定されていることを申し添える。

以上の理由により、博士（理学）の学位を授与できると認める。