

審査の結果の要旨

氏名 チェン ハオ

本論文は、地震予知に適用することを念頭に、亀裂進展のばらつきを評価することができる数値解析手法の開発を目的とする。これは、計算力学と地球物理学の境界に位置する研究であり、計算力学の立場からより合理的な数値解析手法を提案することを念頭に置いている。具体的に開発された数値解析手法は、粒子離散化手法に基づく有限要素法、**PDS-FEM (Particle-Discretization-Scheme Finite Element Method)** を動的問題に適用できるよう拡張したものである。モンテカルロシミュレーションを使った破壊現象の数値実験によって、材料の不均一性や境界条件の乱れに起因する亀裂進展のばらつきを評価した。フィリピン海プレートとユーラシアプレートの簡単なモデルを使った地震活動のシミュレーションも試行した。

本論文の最大の成果は、**PDS-FEM** の動的問題への拡張である。計算量子力学の分野で開発されている、高性能の時間積分手法を適用するため、計算固体力学の分野では比較的稀なハミルトニアンを使った定式化を行った。これは、連続体のラグランジュアンを設定し、**PDS** を使って離散化し、最後に離散化されたラグランジュアンを離散化されたハミルトニアンに変換する、という定式化である。高性能の時間積分手法を組み込んだ **PDS-FEM** のシミュレーションにおいて、エネルギー等の保存量が精度良く保存されるとともに、亀裂進展に伴う急激な歪エネルギーの変化にも堅牢に対応できることを検証している。

PDS-FEM の拡張とは別に、破壊現象の数値実験を行うために、多数の解析モデルを構築する手法を考案している。ランダム分割と要素品質の間にはトレードオフの関係がある（ランダムに分割すると形状の悪い要素が生成され、逆に、要素形状を良くすると分割がランダムでなくなる）。考案された手法は、一様に分割された要素品質の高いモデルに対し、適切な修正を個々の要素に加えていくことで、分割がランダムでありながら品質の高い要素を生成する。考案された手法の性能を検証し、数値実験に適用できることを確認している。

モンテカルロシミュレーションを使った破壊現象の数値実験は、大規模計算が必要となる。このため、**PDS-FEM** に並列化を加えた。2種類のPCクラスタを使って計算性能を検証し、最適の性能が引き出せる設定を検討した。

亀裂進展のばらつきを引き起こす要因の一つは、材料の局所的な不均一性である。平行亀裂が入った板材を対象に、破壊特性の分布を変えた解析モデルを使ったモンテカルロシミュレーションによって、材料不均一性の影響を調べた。この結果、载荷条件によって影響が大きく異なることが示された。载荷速度が低い場合、亀裂進展経路のばらつきは小さく、準静的過程を仮定した理想的な均一状態の解とさほど変わらない。一方、载荷速度が

速くなると、慣性項が影響することにも起因して、均一状態の亀裂進展経路から大きくばらついた進展経路が計算された。しかし、経路は全くランダムとはならず、経路は特定の領域の中にも含まれることも示された。これは、進展経路とそのばらつきが予測可能であることを示す結果である。

亀裂進展のばらつきを引き起こすもう一つの要因である。亀裂が入った立方体ブロックを対象に、境界条件に適当な乱れを加えたモンテカルロシミュレーションによって、境界条件の乱れの影響を調べた。設定された問題では、亀裂進展に与える影響は無視できるほど小さい一方で、変位分布に与える影響があることが示された。

以上の準備を基に、フィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界を対象に、亀裂、すなわち、地震の発生過程のシミュレーションを試行的に行った。観測とシミュレーションを融合させるデータ同化を実現することを念頭に、一つのモデルの地震発生過程を参照解とし、参照解と異なる地震発生過程を起こすモデルを除くことで、適当なモデル群を抽出するを行った。適当な基準を設けることで、参照解と似通った地震発生過程を選択するモデル群を抽出することは可能であることが示された。

以上のように、本論文では、**PDS-FEM**を拡張することで、亀裂進展のばらつきを評価できるような数値解析手法を開発している。複雑な問題を解くために定式化に十分な検討がなされていること、モデル作成や並列化の性能を検証していること、は審査会で了解された。亀裂進展のばらつきの要因である材料不均一性や境界条件に関しても相応の検討がなされていることも了解された。载荷速度に依存した亀裂進展のばらつきの変化が計算された結果は、連続体力学の観点からみても面白いことが指摘された。フィリピン海プレートとユーラシアプレートの地震発生過程の試行シミュレーションは、あくまでも試行の段階であり、論文でも明示されているように、地球物理学の分野で利用するにはより現実的な問題設定をする必要がある。しかし、開発された数値解析手法は、この分野での利用に十分考慮に値するものであることは了解された。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。