

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

非線形動力学・計算材料科学との学際連携に基づく地震現象の多様性の統一的理解

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

イ. 地震断層滑りのモデル化

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

(5) 総合的研究との関連：

(6) 平成 30 年度までの関連する研究成果(または観測実績)の概要：

新規課題

(7) 本課題の5か年の到達目標：

本課題では非線形動力学・計算材料科学的アプローチに基づいた地震研究を行う。具体的には、以下3項目について研究を展開し、従来の実験的摩擦研究や地球物理学的モデルとは異なる観点からの理解を提出し、自然現象としての地震に関する理解を深める。

A. 摩擦の速度依存性の微視的モデル 地震は断層・プレート境界の力学的不安定性の結果であり、その本質を理解するためには摩擦法則の理解が必須である。いくつかの仮定を置くと、摩擦の力学的不安定性には定常状態摩擦力が負の滑り速度依存性を持たねばならないことがわかる。ゆえに、定常状態摩擦力が負の速度依存性を示すための微視的物理条件を定量的に詰めることが本質的に重要である。負の速度依存性の本質は、真接触面積の時間依存性(エイジング)にあるとこれまで思われてきた。しかし近年の分子論的スケールの実験によれば、真接触面積ではなく応力そのものがエイジングを示し、真接触部位の局所的な強さも時間とともに増大しうることを意味する。この物理的原因は分子論的な構造緩和と予想される。実際に、結晶構造が乱れたアモルファス系ではこのようなエイジングによる強度回復が知られている。本課題では、分子論的構造緩和を時間依存過程として取り入れた連続体モデルを構築し、摩擦の速度依存性の正負を決める微視的パラメタを同定する。

B. 断層相互作用系フルモデルの効率的シミュレータ開発 断層どうしの相互作用は地震活動の複雑性を決める重要な要因であり、例えば余震の性質(大森則の p 値、 c 値)や GR 則の b 値にも影響を与

えると考えられている。他方、断層多体系の作る地質学的構造（ひずみ集中帯など）とその形成過程は重要な学際的課題だが、そのような長時間スケールの挙動には断層間相互作用のみならず断層強度回復の時間依存性も大きく効くため、計算負荷が非常に高くなる。そのため、定量的なシミュレータ開発がこれまで困難であった。この問題を解決すべく、本課題では点震源多体系を対象を絞ることで効率的なシミュレータ開発を行う。より具体的には、時間発展に kinetic Monte Carlo 法を採用し、波数空間で応力再分配を計算することで、計算負荷を大幅に低減する。イベントに伴う弱化と回復過程は考える状況によって変わりうるので、その設定は自由に換えられるよう、汎用性を高めたシミュレータを開発する。開発したコードを用いて、GR 則の成立を確認し、 b 値の時空変動特性について応力の絶対値や空間不均一性への依存性をノイズ（擾乱）の影響などを定量的に確立する。最終的には媒質の不均一性（特に弾性率の不均一性）を取り扱えるようなアルゴリズムも実装し、空間的な不均一性、特にひずみ集中帯形成過程とそのメカニズムを調べる。

C. 摩擦不安定性におけるノイズや応力摂動の効果に関する力学系理論的研究 現状、摩擦不安定性の理解は速度状態依存摩擦則に基づき分岐現象（Hopf 分岐）として理解されているが、実際にはその描像とは矛盾する観測事実が知られるようになってきた。分岐理論においては、不均一性やノイズが分岐の性質を定性的に変えることが知られているが、沈み込み帯においても潮汐やプレート沈み込み速度の変動など、ノイズや摂動としてみなせる要因が多く存在する。ゆえに、このような擾乱を考慮した摩擦不安定性の理論を作り、観測事実を解釈し直す必要がある。本課題では、沈み込み速度の振動や変化が摩擦不安定性に与える影響について、シミュレーションと数理的な解析を行い、観測データと比較する。可能であれば安定性の変化を分岐理論的に理解する。とくに、スロー地震は潮汐などの応力摂動に鋭敏であることが知られているため、分岐点におけるノイズの影響を定式化しその現象論を確立することで、スロー地震への理解を深める。

（ 8 ）本課題の 5 か年計画の概要：

A. 摩擦の速度依存性の微視的モデル 2019～2020 年度においては、アモルファス系の微視的な変形イベントを熟活性化過程としてモデル化した上で、空間自由度を考えない平均場モデルに基づき、摩擦力の速度依存性を計算する理論的な枠組みを構築する。平均第一到達時間を計算することで巨視的な摩擦ダイナミクスの特徴的時間スケールを評価することで摩擦力を計算する。構造緩和に関わる微視的パラメタが摩擦の速度依存性に及ぼす影響を定量化し、負の速度依存性が実現されるための一般的条件を確立する。2021 年度からは空間自由度を考慮した計算を行い、2022～2023 年度にかけて負の速度依存性が実現されるためのより一般的な条件を確立する。

B. 断層相互作用系フルモデルの効率的シミュレータ開発 2019 年度においては、プロトタイプとして固体アモルファス材料の粗視化モデルに対する kMC シミュレータを構築する。2020 年度においてはシミュレーションを実行して、アモルファス固体における塑性現象の臨界的な挙動を調べ、時間的な挙動（特に余震統計と待ち時間分布）および空間的な特性（stress shadow 的な塑性イベントの発生など）、ノイズ（擾乱）の影響などを調べる。2021～2022 年度にかけては、前年度までに開発したシミュレータを拡張し、断層多体系や亀裂多体系を取り扱えるよう、イベント頻度と時間依存回復過程をマクロスケールで非熱的にモデル化し、kMC シミュレータへ実装する。2023 年度においては、弾性率の不均一性を取り扱えるように kMC シミュレーションを拡張し、亀裂進展ダイナミクスが本シミュレータで取り扱えるようにする。開発したシミュレータを用いて、空間的な不均一性、特にひずみ集中帯形成過程とそのメカニズムを調べる。

C. 摩擦不安定性におけるノイズや応力摂動の効果に関する力学系理論的研究 2019 年度においては、偏微分方程式を系統的に簡略化する非線形動力学分野の手法（縮約理論）を用いて、不均一なプレート境界を速度状態変数摩擦法則でモデル化した偏微分方程式系を、分岐点近傍に注目してより簡素な方程式系へ帰着する。2020 年度においては、初年度で導出した偏微分方程式系について、その分岐構造を明らかにする。2021～2023 年度においては、分岐点近傍にある系について、ノイズが滑りの安定性に及ぼす効果に関して、シミュレーションと数理的な解析を行い、観測データを比較する。

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東京大学地震研究所 数理系研究部門

東京大学大学院理学系研究科

他機関との共同研究の有無 : 有

大阪大学理学研究科 波多野恭弘

金沢大学自然科学研究科 新山友暁

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻理論物質学講座

電話 :

e-mail :

URL : <http://thmat8.ess.sci.osaka-u.ac.jp>

(11) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 亀伸樹

所属 : 東京大学地震研究所