

(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：

(和文) 摩擦運動に対する微細不均質構造の影響と実効的摩擦法則の可能性  
(英文) Coarse-grained friction law of heterogeneous faults

(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

(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
  - (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
    - ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震
- 2 地震・火山噴火の予測のための研究
  - (1) 地震発生の新たな長期予測（重点研究）
    - ア. プレート境界巨大地震の長期予測
  - (2) 地震発生確率の時間更新予測
    - ア. 地震発生の物理モデルに基づく予測と検証

(5) 令和5年度までの関連する研究成果（または観測実績）の概要：

新規研究

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地震発生の力学において鍵となる物理法則は断層の摩擦法則である。摩擦法則については速度・状態依存摩擦法則が実験室スケールで確立されているが、状態変数とその発展法則は経験的に設定されており、微視的な物理過程から系統的に導出されるようにはなっていない。その一方で、岩石試料の摩擦面と天然断層のサイズは大きくかけ離れており、実験室スケールで経験的に成り立つ法則が断層スケールでも成り立つ保証はない。従って、速度・状態依存摩擦法則を断層スケールにそのまま適用することには根本的な問題があるのが現状である。この困難を解消するためには、実験室スケールで成立する摩擦法則が依拠する物理過程を特定した上で、その物理過程がスケールを変えた際にどう変わるかを定量的に議論しなくてはならない。

その際問題になるのは、断層面の不均質性である。例えば速度・状態依存摩擦法則は3つのパラメータを含むが、このうち二つ(a, b)は岩石物性から決まると考えられる。断層面に存在する岩石種・鉱物種には空間不均質性があるため、摩擦パラメータ(a, b)にも空間不均質性があるはずだ。いわゆる「アスペリティモデル」もこのような空間不均質性を表す一つのモデルと言えるが、アスペリティ内部では空間均質性が仮定されている。多くの場合「アスペリティ」は震源領域とほぼ等価なのでそのサイズは数km～百km前後ということになるが、そのように広大な震源領域に渡って均質性を仮定してよいのか、自明ではない。むしろ摩擦パラメータの不均質性も短波長から長波長まで（例えば数cm程度から数km程度の波長まで）フラクタル的に分布していると考えるのが自然だろう。

このようにフラクタル的な空間不均質性をもつ断層面の動力学は、例えば井出・青地らによって研究されているが、そこではすべり弱化的な摩擦法則を仮定し、臨界すべり距離 $D_c$ がフラクタル的に分布するモデルを考えている。これは地震すべりに伴う動的弱化を表しており、観測・実験とも整合的で

はあるが、速度・状態依存摩擦法則のパラメタとの対応づけは難しい。また、通常地震のモデルとしては問題ないが、スロー地震のような中間的な不安定性を論じられるかは不明である。そこで本課題では、速度・状態依存摩擦法則自体に注目し、空間スケールを大きくしていった際に摩擦法則がどのように変化するかを系統的に解明する。臨界すべり量 $D_c$ とは異なり、速度状態依存則のパラメタ(a,b)がフラクタル的に分布している証拠はない。そこで空間分布についてはランダムな場合も含めて様々なケースを調べる必要がある。いずれの場合でも、地質学的構造の最短波長に対応する面積要素を最小構成単位として扱い、摩擦パラメタが空間的に（フラクタル的あるいはランダムに）分布した断層面を考える。この断層面が全体として均質な速度・状態依存摩擦法則に従うとみなせるか、それがどのような条件において可能になるかを調べる。例えば不均質性が弱い場合は、速度弱化パッチが複数存在しても滑り面全体が一様に一定速度で滑ることが可能かもしれないし、あるいは滑り速度が面全体で一様に振動するかもしれない。これらの場合は、不均質な摩擦面が実効的には均一な面とみなせることを意味しており、面全体の摩擦特性が新たなパラメタで代表されるはずである。これを「摩擦法則の粗視化」と呼ぶ。本課題の到達目標は、摩擦法則の可視化が可能な場合とそうでない場合がどのような条件で決まるかを、いくつかの具体的な設定のもとで明らかにすることである。一般に、粗視化の可能性はすべりダイナミクスに依存すると予想される。例えば動的な不安定性をもつダイナミクス（通常地震など）では、空間不均質性のわずかな違いが不安定性によって増幅され、均質な速度・状態依存摩擦法則には帰着されないことが予想される。従って、本研究では不安定性が弱い場合（Hopf分岐点近傍）を中心に解析を行う。不安定性が強い場合（通常地震になる場合）については、すべり核生成過程に焦点を絞り、すべり核のサイズを均一な場合の理論式と比較することで、「不均質性を考慮した均一なパラメタ」が存在するかを調べる。

#### (7) 本課題の5か年計画の概要：

初年度から3年目（2024～2026年度）においては摩擦パラメタの空間分布がランダムな場合を考え、2027～2028年度においてフラクタル的に分布した場合を考える。

まず初年度（2024年度）においては、もっとも簡単な場合として弾性体の面外厚さが薄い系（すなわちバネブロックモデルに帰着される場合）を考える。この系では核形成過程こそ正しく論じられないものの、面外の薄さによるカットオフ効果により最近接相互作用しか働かないため、系のダイナミクスは境界条件にさほど依存しないことが期待される。そこで周期境界条件など比較的容易な条件でシミュレーションを行い、一様定常すべりが可能な摩擦不均質性の条件を系統的なシミュレーションによって解明する。また、その条件から少し外れると一様に振動することが期待されるが、その実現可能性は不均質性の度合いに依存する。摩擦不均質性の条件を系統的に変化させ、一様な振動が可能な条件を数値的に解明する。

2年目（2025年度）においては、同じ作業を一般的な厚みをもつ系について行う。この場合はすべり核形成過程が論じられるので、（準）定常状態の実現可能性だけでなく、すべり核形成過程におけるモーメント解放量について均一系の理論と比較し、粗視化された摩擦パラメタで記述されるかどうかを論じる。

3年目（2026年度）においては1、2年目の結果に基づいてそのスケール依存性を議論する。シミュレーションにおいて摩擦パラメタを設定する最小構成要素の大きさ自体は任意であるはずだが、大数の法則よりメッシュのサイズとパラメタの分散が関係しているはずである。ただしその場合の大数の法則が単純な算術平均に基づくものかどうかは不明である。そこで1～2年目の結果に基づき、摩擦パラメタの粗視化がどのような計算に基づいているか推定し、その式に基づいた大数の法則を定式化する。その上で、メッシュサイズとパラメタの分散の関係について一般化された大数の法則を提案する。

4～5年目（2027～2030年度）においては、空間的にフラクタル分布した摩擦パラメタの系について1～3年目と同じ解析を行う。この場合の結果は断層面のラフネスのフラクタル性とも関係するので、余裕があれば面の方位のランダムネスを実効的にモデル化する可能性についても検討を加え、完全なグリーン関数に基づく計算結果とも比較する。

#### (8) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

亀伸樹（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

波多野恭弘（大阪大学大学院理学研究科）

(9) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：大阪大学大学院理学研究科（波多野恭弘）

電話：

e-mail：hatano@ess.sci.osaka-u.ac.jp

URL：

(10) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：波多野恭弘

所属：大阪大学大学院理学研究科