

(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) 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、速度弱化作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質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（通常の地震など）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（通常の地震になる場合）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。

(6) 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はあるはずだが、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。

(7) 令和7年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2025年度においては、断層帯内部構造（厚み方向に関する構造）の考察に取り組んだ。すべり面が複数存在しそれらが相互作用する系の力学モデルを構築し、数値実装および系統的パラメータスタディを実施した。特に、スロースリップイベントや低周波微動など、従来の単自由度ばねブロックモデルでは十分に記述できなかった複雑な滑り様式の再現と、その物理的解釈を目標とした。

まず、断層帯の厚み方向の不均質性と層間相互作用を取り入れるため、3ブロック・2摩擦界面からなる多自由度ばねブロックモデルを構築した。各ブロックは弾性バネで接続され、上下の摩擦界面には

速度状態依存摩擦則（Rate-and-State Friction, RSF）を適用した。これにより、単一界面ではなく、複数界面が競合・協調する系として断層運動を扱う枠組みを整備した。

理論面では、RSF則に基づく運動方程式を整理し、定常滑り解のまわりでの線形安定解析を行った。その結果、系がスティックスリップ不安定を起こす条件として、バネ定数が臨界剛性より小さいことが必要であることを確認し、法線応力の増大が不安定化を促進することを理論的に再確認した。これにより、後に行う数値計算の妥当性を評価する理論的基準を明確にした。

数値計算においては、RSF則に含まれる対数項が低速域で発散するという問題に対処するため、逆双曲線正弦関数（ $\operatorname{arcsinh}$ ）を用いた正則化手法を実装した。この正則化により、滑り速度がゼロに近づく極限でも摩擦係数が有限に保たれ、固着状態を自然に含む長時間シミュレーションが可能となった。低速極限では線形粘性減衰として振る舞い、高速極限では従来の対数依存と一致することを漸近展開により確認し、物理的一貫性と数値安定性を両立していることを示した。

構築した運動方程式は9成分の一階常微分方程式系に書き換えて数値積分を実行した。過渡的応答を除去した後の定常状態に対して解析を行い、統計的に安定した結果を得た。

パラメータスタディとして、層間結合剛性 k を0.1~2.0、法線応力（摩擦強度） f を0.1~5.0の範囲で系統的に掃引し、約1000通りの組み合わせについて計算を行った。その結果、系の挙動は単純な周期振動から複雑なカオスの振動へと連続的に遷移することが明らかとなった。一般に、剛性 k を固定すると法線応力 f の増大に伴い周期的挙動からカオスの挙動へと移行する傾向が確認された。一方、 f を固定した場合の k 依存性は単純ではなく、層間相互作用の強弱によって多様なモードが現れることが分かった。得られた時系列データに対して高速フーリエ変換（FFT）を適用し、パワースペクトルに基づいて滑り様式を分類した。その結果、本モデルの挙動は大きく5つのモードに整理できることを見出した。すなわち、(I) 片方の界面のみが周期振動するモード、(II) 両界面が同期して周期振動するモード、(III) 一方が周期的で他方がカオス的となる混合モード、(IV) 一方のみがカオス的となるモード、(V) 両界面がカオス的となるモードである。特に、片方が周期、他方がカオスという混合モードは、多自由度系特有の現象であり、単一界面モデルでは現れない挙動であることを確認した。

さらに、特定のパラメータ領域では、時間発展の途中で卓越する界面が切り替わる現象が観測された。これは、一方の界面でのエネルギー散逸や応力再配分が他方の不安定条件を変化させることにより、支配的な滑り面が動的に選択される結果であると解釈される。滞在時間の異なる間欠的スイッチングや、明瞭な単発的スイッチなど、複数のタイプの切り替わりが確認され、界面間の競合ダイナミクスが系の本質的特徴であることが示唆された。

物理的解釈としては、層間結合が強い場合には界面が一体化して同期的に振る舞い、結合が弱い場合には界面が独立に不安定化する傾向があることが分かった。また、法線応力が高い場合には臨界剛性が増大し、不安定性が強まることでカオスの振動が出現しやすくなる。これらの結果は、浅部クリープ域における孤立アスペリティの周期挙動や、深部における不規則微動、さらには高封圧下での複雑な滑り様式と対応づけて解釈できる可能性がある。

以上のように、2025年度は、多層構造を持つ断層モデルの構築、数値安定化手法の確立、長時間・大規模パラメータ掃引の実施、スペクトル解析による滑り様式の体系的分類という一連の作業を完了した。その結果、単一の物理モデルの枠内で、周期振動からカオス、さらには界面間スイッチングまでを統一的に再現・整理することに成功した。本成果は、スロー地震や微動を含む多様な断層滑り現象を理解するための基礎的枠組みを与えるものであり、今後の外部摂動応答や潮汐鋭敏性の解析へと発展可能な基盤を構築したといえる。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

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」においては、断層面やその周辺におけるひずみと応力の蓄積、地震時の断層破壊過程、地震活動の階層性などに関する理解に基づいて地震の発生過程の解明を進めている。いずれの課題においても断層の複雑な構造とそれらが引き起こすダイナミクスの理解が求められている。本研究では断層帯における多様な滑り様式を統一的に理解するための力学モデルを構築して地震発生過程の物理的理解を深化させるという基盤的役割を担っている。

巨大地震による災害の軽減には、発生確率の評価、切迫度の把握、前兆現象の理解など、多層的な科学的基盤が必要である。その中核には、「断層がどのような条件で安定から不安定へ遷移するのか」

「スロー地震や微動は巨大地震とどのような関係にあるのか」といった根源的問題が存在する。本研

究では、3ブロック・2摩擦界面モデルを用いて、層間相互作用と摩擦不安定性の競合が滑り様式を決定することを示し、周期的挙動からカオスの挙動までを一つの枠組みで再現した。特に、片方の界面が周期的に振る舞う一方で他方がカオスになる混合モードや、時間発展の途中で卓越界面が切り替わる現象は、多自由度系としての断層帯の本質を示唆する結果である。

これらの知見は、断層が単一の「臨界点」に向かう単純な系ではなく、複数の準安定状態を行き来する複雑系であることを示している。災害軽減の観点から重要なのは、どのようなパラメータ条件で系がカオス的・高感受性状態に入るのかを理解することである。本研究では、法線応力の増大や結合剛性の低下が不安定化やカオス化を促進する傾向を明らかにした。これは、深部高封圧環境や破碎帯の発達した領域において、微小な外部摂動に対する応答性が増す可能性を示唆するものであり、潮汐応力や流体圧変動と地震活動の相関を議論する上での理論的基盤となる。

また、FFTによるスペクトル解析に基づく滑り様式の分類は、観測データとの比較可能性を持つ。実際の地震・微動データのスペクトル構造や時間変動と、本研究で得られたモード分布を照合することで、観測される滑り現象がどの力学領域に対応するのかを推定できる可能性がある。これは、将来的に「現在の断層がどの動力学状態にあるのか」を評価するための物理的指標の構築につながり得る。

今後の展望としては、第一に、外部周期摂動（潮汐応力など）や確率的ノイズをモデルに導入し、カオス状態の安定化や同期現象の有無を体系的に調べることが挙げられる。カオス系においては微小な外部入力秩序を誘起する場合が知られており、これがスロー地震の潮汐鋭敏性とどのように関係するかを検証することは、発生タイミング予測の精度向上に寄与する可能性がある。

第二に、より多自由度化したモデルや連続体近似への拡張を行い、空間的不均質性や破壊伝播を明示的に扱うことで、巨大地震核形成過程との接続を図る必要がある。現在のモデルは最小構成の多層系であるが、その中で既に多様なモードとスイッチングが現れることが確認された。この性質がより高次元の系でも保持されるならば、観測される複雑な地震活動の統一的理解へとつながる。

第三に、観測データとの統計的比較を進め、モデルパラメータと実際の地殻条件との対応関係を定量化することが重要である。これにより、断層の力学状態推定という応用的課題へ一歩近づくことができる。

本研究は、直接的な防災技術の開発ではなく、断層の動力学の本質を理解するための基礎研究である。しかし、災害軽減のためには、観測・統計・工学的対策を支える強固な物理的理解が不可欠である。多層断層モデルに基づく滑り様式の体系的理解は、地震発生過程の不確実性を構造的に整理する枠組みを提供するものであり、長期的には地震ハザード評価や前兆現象の物理解釈に資する基盤的成果と位置づけられる。

- (8) 令和7年度の成果に関連の深いもので、令和7年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
・論文・報告書等

Sakamoto, R. and T. Hatano, 2025, Effect of wavelength on modulus softening and triggered slip in sheared granular matter, *Geophysical Journal International*, Volume 243, ggaf342, 10.1093/gji/ggaf342, 査読有, 謝辞有

- ・学会・シンポジウム等での発表

- (9) 令和7年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

- (10) 令和8年度実施計画の概要：

スロー地震に見られる再来間隔や振幅の時間変動はしばしば単純な周期性ではなく、周期倍化や不規則振動を含む複雑な時系列構造を示す。とくに微動については周期的挙動と不規則挙動が混在する事例も観測されており、その背景にある力学的メカニズムは十分に理解されていない。

2026年度においては、その物理的起源を明らかにすることを目的として、流体の影響を考慮した断層モデルの提案と解析を行う。スロー地震の「時系列特性の複雑性」を最小限の力学モデルで再現し、その分岐構造を体系的に整理することを目標とする。

モデルとして、プレート境界上を一定速度で滑る断層面の中に、流体を多く含む小規模パッチが埋め

込まれている状況を仮定する。パッチは周囲と弾性的に結合され、摩擦には速度状態依存摩擦則 (rate-and-state friction law) を適用する。流体圧については、滑り速度に依存しつつ有限の緩和時間で定常値へと緩和する動的方程式を導入する。これにより、滑り量・状態変数・流体圧の三変数からなる連立常微分方程式系を構築し、その挙動と分岐構造を明らかにする。

(11) 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）

(12) 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：

(13) 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