

氏名・（本籍）	くわ はら やす と 栗 原 保 人
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 966 号
学位授与年月日	昭和 61 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 （博士課程）地球物理学専攻
学位論文題目	An Experimental Study on Dynamic Sliding Process during Stick-Slip and Its Implication to Earthquake Faulting （固着—すべりの動的過程に関する実験的研究） （とその地震断層運動論的意義）
論文審査委員	（主査） 教 授 平 澤 朋 郎 教 授 高 木 章 雄 教 授 鈴 木 次 郎 助 教 授 長 谷 川 昭

論 文 目 次

Acknowledgement

Abstract

Chapter 1. General Introduction

1-1. Introduction

1-2. A Brief Riview of Stick-Slip Experiments in Relation to Earthquake
Source Processes

1-3. Scope of This Study

Chapter 2. Experimental Methods

2-1. Samples and Sensors

2 - 2.	Apparatus and Loading Conditions
Chapter 3.	Dynamic Property of Shear Failure
3 - 1.	Introduction
3 - 2.	Characteristics of Dynamic Rupture Propagation
3 - 3.	Detailed Slip-Weakening Process
3 - 4.	Physical Parameters of Propagating Rupture
3 - 5.	Discussion
3 - 6.	Conclusion
Chapter 4.	Effects of Nonuniformity of Sliding Surface
4 - 1.	Introduction
4 - 2.	Characteristics of Sliding Surface
4 - 3.	Effects of Surface Roughness
4 - 4.	Effects of Surface Waviness
4 - 5.	Effects of Nonuniform Stress Fields
4 - 6.	Discussion
4 - 7.	Conclusion
Chapter 5.	Scaling Law for Shear Instability
5 - 1.	Introduction
5 - 2.	Characteristics of Surface Topography of Earthquake Fault
5 - 3.	Scaling Relation of Fracture Parameters
5 - 4.	Scaling Hypothesis for Shear Failure
5 - 5.	Discussion and Conclusion
Chapter 6.	Conclusions and Suggestion for Further Study
6 - 1.	Conclusions
6 - 2.	Suggestion for Further Study
References	

論文内容要旨

1. はじめに

地震断層運動のシミュレーションとして、岩石試料による固着-すべり (stick-slip) の実験的研究を行った。本研究の目的は、第1に、地震 (すなわち地殻構成岩石の不安定すべり) の発生過程と関連して室内実験における不安定すべりを制御している因子を明かにすることである。第2に、短周期地震波励起の問題と関連して不安定すべりの伝播過程の詳細を解明することである。第3に、室内実験で得られた結果を地震断層運動に適用するために、寸法効果のある震源パラメーターを識別し、せん断破壊に関する規模法則の基礎を確立することである。

多様な形態を示すせん断破壊の特性は、破壊が発生する媒質のもつ様々なスケールの不均質性、もしくは、非一様性に強く依存している。したがって、本研究では、岩石試料における断層面非一様性の定量化と、その効果の総合的・統一的解釈を試みた。

2. 実験方法

長さ40cmの既存断層面を有する花こう岩、または安山岩試料を用いて、2軸せん断試験を行った。断層の幅は10cmまたは5cmである。本研究では断層面非一様性として、面の粗さ、うねり、および断層面上の巨視的応力分布をとりあげた。面の粗さについては、異なる粒子径 (5 μm ~310 μm) の研磨材で断層面を研磨することにより、異なる粗さの面を用意した。面のうねりについては、2種類の異なるうねりをもつ試料を用意した。また、応力分布の巨視的非一様性は、試料への印加応力を作意的に非一様化することによって生じさせた。これらの非一様性の波長帯域は1 μm ~数10cmである。

サーボ機構付き二軸圧縮試験機を使用し、法線応力2~35MPaでこのような非一様性を有する断層面上に固着-すべりを発生させた。断層沿いの局所的せん断歪の測定には半導体歪ゲージを用いた。くい違い時間関数の測定には金属線歪ゲージが有効であることを明かにし、これを使用した。これらの信号に対する測定系の振幅特性はDC~200kHzの周波数帯域で平坦である。さらに、準静的歪変化については3成分の歪測定を行い、主歪の振幅と方向を求めた。これらの測定系により、すべり伝播過程の動的挙動が満足すべき分解能で計測された。

3. せん断破壊の動的性質

i) すべりの定常伝播過程：レーリー波速度に近いすべり伝播速度をもつ破壊伝播過程について調べた。すべり先端の破損領域の広がり、すべり速度、すべり加速度が測定され、slip-weakening モデルから理論的に計算される結果とその概略において一致することが示された。ここで、slip-weakening モデルとは、すべり量がゼロからある臨界すべり量 d_c に至るまでに、すべり面のせん断強度が静摩擦力から動摩擦力に連続的に減少するというモデルである。

ii) 破壊生成過程：断層面上ですべり領域が拡大し、ある臨界長 L_c に達すると急激にすべり

伝播速度が大きくなる。すべり領域の長さが L_c 以下のすべり伝播過程をここでは破壊生成過程と呼ぶ。破壊生成過程においては、すべり先端域での応力集中と破壊エネルギーは定常伝播過程におけるそれらよりも、有意に小さいことが明かになった。

iii) slip-weakening 過程の詳細：すべり先端域におけるくい違い、すべり速度、せん断応力の相互関係をモデル化した。すべり量に対するせん断応力の低下率は、slip-weakening 過程において、時間と共に変化する。すなわち、その初期段階で大きく、その後急激に減少して、後期段階で小さい。

4. すべり面の非一様性の影響

i) 面の粗さ・うねりの定量化：すべり面の形状を触針法で測定し、そのパワー・スペクトルによって形状を表現した。その特徴は、長波長域では平坦で、短波長域では波長(λ)のべき(n)乗に比例することである。すなわち、スペクトルにコーナー波長 λ_c が存在し、その値は研磨材の粒子径にはほぼ一致する。さらに、短波長域における振幅と n の値は粗さによらずほぼ一定である。したがって面の粗さはコーナー波長(λ_c)によって特徴づけられる。

ii) すべり過程に対する断層面の粗さの影響：安定すべりから不安定すべりへの遷移条件として、すべり量が $\lambda_c/2$ を超えることが必要であることを明かにした。なお、ここでは不安定すべりを、その破壊伝播速度がS波速度の40%を超えるすべり、と定義した。これまでの実験的研究で、法線応力が高いほど、また、圧縮機の剛性が小さいほど、不安定すべりが発生し易い、という結果が得られている。本研究で得られた安定-不安定すべり遷移条件はこれらの結果をも同時に満足している。

iii) すべり過程に対する断層面のうねりの影響：波長2cm~10cmのうねりが卓越した面では、法線応力が高くなるに従い、単一の不安定すべり(シングル・スリップ)から多重の不安定すべり(マルチプル・スリップ)に移行していく。マルチプル・スリップのslip-weakening過程を調べると、同一の場所で強度低下(weakening)過程と強度回復過程が繰返していることが明かになった。すべり速度時間関数のパワー・スペクトルにはコーナー周波数 f_c が存在し、 f_c は法線応力の増加にほぼ比例して増大する。これは、すべり面上のうねりに起因する接触域相互の平均間隔が法線応力の増加にほぼ比例して小さくなる、と考えることによって説明される。

iv) すべり過程に対する応力場の巨視的非一様性の影響：波長およそ10cm以上の非一様性の影響を調べるため、圧縮機の圧盤と岩石試料との位置関係を調整することにより断層面上の応力分布を非一様化した。断層面上の4か所における局所的せん断応力の標準偏差がその平均値の約40%以下のとき、不安定すべりが発生し、40%以上では安定すべりとなる。さらに応力場が一様なものほどすべり伝播速度が大きい。なお、このような非一様性の場合でも、(ii)で述べた遷移条件は成り立っている。

v) 粗さとうねりの影響に関する統一的理解：弾性球の接触理論を利用して、断層面形状のスペクトルを断層面上の法線応力のスペクトルに変換した。法線応力は近似的にせん断強度に比例

すると考えてよいから、法線応力のスペクトルを強度のスペクトルとみなす。形状のスペクトル・コーナー (λ_c) は、最大強度を与える波長であり、うねりの卓越波長は、強度のスペクトルで極大値を与える。(ii)の結果より、すべり量が λ_c の50%を超えたとき、破壊は断層面全体に不安定に拡大する。 λ_c より長波長側に強度の極大値が存在するとき、(iii)の結果より、マルチプル・スリップになり、その極大値を与える波長に相当する高周波弾性波を励起する、と解釈される。

5. せん断破壊のスケーリング仮説

i) 地震断層面とフラクタル：自然界に存在するフラクタルの性質を外挿することが許されるなら、地震断層面の形状スペクトルが λ^n ($2 < n < 3$)に比例すると考えることができるであろう。一方、室内実験の結果は、不安定すべりが発生するためには、断層面の形状スペクトルにコーナー波長 (λ_c) が存在し、すべり量が $\lambda_c/2$ 以上でなければならないことを示している。地震が不安定すべりであるとするなら、室内実験の場合と同様に、地震断層面にも λ_c が存在すると考えなければならない。

ii) 規模に依存するパラメーター：実験室におけるせん断破壊のパラメーターの値と地震における値を比較すると、破壊伝播速度、すべり速度、応力降下量は規模に依存しないパラメーターと考えられる。破壊エネルギー、最大すべり加速度、slip-weakening 過程における臨界変位量は規模に依存し、それらは λ_c によってスケーリングできることが示された。地震断層における破壊エネルギーと実験室の値から、たとえば長さ10km程度の地震断層の λ_c は約1mと推定され、この値はすべり量の値とほぼ等しい。これは地震規模に対する λ_c とすべり量との関係を示唆する。

iii) スケーリング仮説：(i)、(ii)の結果に基づいて、実験室の規模から地震の規模まで適用可能なスケーリング仮説を提唱した。すなわち、いかなる断層に対してもすべり量の2倍の値に等しい断層面形状のコーナー波長 (λ_c) の臨界値 (λ_c^*) が存在する。これは λ_c^* が断層の規模 (たとえば長さ) に比例するという規模法則である。この仮説によると実際の断層面形状の λ_c が λ_c^* よりも大きい断層では安定すべりの発生が、 λ_c が λ_c^* よりも小さい断層では不安定すべりの発生が期待される。さらに、 λ_c が λ_c^* にほぼ等しい断層では、地震発生に先行して前駆すべりが発生し易いことを室内実験の結果が示している。

論文審査の結果の要旨

活断層における大地震の発生、非地震性クリープの発生、地震に先行する前駆すべりの発生などを支配する条件の解明は現在の地震学の重要な課題である。著者は、地震断層運動のシミュレーションとして、岩石試料による固着-すべりの実験的研究を行った。その主目的は、すべり面の非一様性の定量化に基づいて、不安定すべりの挙動を制御している因子を明らかにするとともに、寸法効果のある震源パラメーターの識別からせん断破壊に関する規模法則確立への道を拓くことである。本論文によって得られた新しい知見は以下の通りである。

触針法による測定に基づいて、すべり面の形状がそのパワー・スペクトルによって表現された。その特徴は、短波長域で波長のべき (n) 乗に比例して増大し、長波長域では比較的平坦であって、スペクトルにコーナー波長が存在することである。短波長域における振幅と n の値は面の粗さによらずほぼ一定で、 n は 2.5 前後の値をとる。したがって、波長数ミクロンから数百ミクロンのすべり面の粗さはこのコーナー波長で特徴づけられる。安定すべりから不安定すべりに遷移する必要条件は、すべり量が面のコーナー波長の $1/2$ を超えることである。法線応力や圧縮機の剛性などの影響もこの単純な遷移条件にすべて組み入れられている。

実験室におけるせん断破壊を記述するパラメーターの値と、地震現象における値を比較することにより、規模に依存するパラメーターが破壊エネルギー（単位面積あたり）、最大すべり加速度、スリップ・ウィークニング過程における臨界変位量であり、これらがすべてすべり面のコーナー波長でスケールされることを明らかにした。たとえば、長さ 10km 程度の地震断層のコーナー波長は約 1 m と推定される。これらの結果と自然界のフラクタルの性質に基づいて、室内実験結果を地震規模の現象に適用し得るよう、せん断破壊に関するスケイリング仮説を提唱した。

以上の如く、本論文によって、不安定すべりの生成・発達過程に関する新しく重要な知見が数多く得られ、地震断層運動のより深い理解が可能となった。これは著者が自立して研究活動を行うに十分な高度の学識と研究能力を有することを示している。よって、栗原保人提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。