

氏 名	野 田 博 之
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 3261 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 地 球 惑 星 科 学 専 攻
学位論文題目	Fault constitutive laws for a wide range of slip rates and effects of thermal weakening processes on dynamic rupture propagation characteristics (広い速度領域における断層の構成則と、熱的弱化機構の破壊伝播様式に対する影響)
論文調査委員	(主 査) 教 授 平 原 和 朗 准 教 授 久 家 慶 子 教 授 中 西 一 郎

### 論 文 内 容 の 要 旨

天然の活断層は、低速から高速まで、非常に広い範囲の変位速度を経験する。本学位申請論文は、そのような広い速度範囲における断層の摩擦構成則の理解と、断層運動、特に地震時の動的破壊に対するその重要性に関する研究をまとめたものであり、全4章から成る。

第1章は滋賀県今津町に露出する花折断層露頭から採取した断層ガウジを用い、低速摩擦 (0.01-100  $\mu\text{m/s}$  程度) 時の、速度・状態変数依存型摩擦構成則のパラメータの決定を行った。また、実験に用いた試験機の剛性の誤差の影響を解析し、摩擦パラメータ推定時に試験機の剛性も同時に決定する新しい手法を提案した。実験の結果、摩擦係数の速度依存性 ( $\alpha - \Sigma b$ ) は変位速度 ( $V$ ) と共に増加し、0.1  $\mu\text{m/s}$  程度で負から正になる事、 $V > 1 \mu\text{m/s}$  では二つの状態変数 (一方の  $b$  は負) が現れる事、状態変数の変化の長さスケール ( $L$ ) が変位速度と共に増加する事、等が明らかとなった。

第2章は高速摩擦に関し、特に摩擦発熱による間隙圧の上昇 (Thermal pressurization, T. P.) と微視的接触部の閃光発熱 (Flash heating, F. H.) に焦点を当てた。T. P. に関しては、第1章と同じ露頭から採取したサンプルを用い室内試験により剪断変形の集中域近傍の水理定数をモデル化し、その動的破壊に対する影響を調べた。その結果、特に変形の集中域の幅が破壊の進展に大きな影響を与える (幅が広いときには破壊が進展しないような場合でも、幅を狭くすると super shear transition を起こす) 事が明らかとなった。また、F. H. に関しては、既存のモデル (摩擦係数は  $V$  の関数) を変位速度・状態変数依存型の摩擦構成則への組み込みを行った。純粋な変位速度依存型のモデルは弾性体との相互作用を計算する事ができないが、本論で用いた手法によって摩擦構成則に組み込めば、任意の  $f(V)$  を用いて弾性体との相互作用を計算する事が可能となる。

既存の F. H. のモデルは、微視的接触部の構成則に大変単純なモデルを仮定している (温度が一定の値に達すると急激に強度が低下する)。第3章ではこの部分に熱活性型の滑り過程を仮定することにより、中速領域における摩擦構成則を数値計算的、解析的手法を用いて構築した。本論で導出した構成則は、過去の斑レイ岩、アルミナセラミクスを用いた実験と調和的である。また本研究は断層が低速から高速へと加速する際、温度変化が重要となる可能性を示唆する。

高速摩擦時には急激な摩擦強度の低下が起こるが、第4章ではそういった挙動が破壊の伝播様式 (crack 状/pulse 状破壊) に与える影響を調べるため、F. H. と T. P. 両者を組み込んだ動的破壊のシミュレーションを行った。過去の研究により、速度弱化 (すなわち、摩擦抵抗が  $V$  の関数  $\tau_{ss}(V)$  で近似できる) の性質を持つ断層では、初期の剪断応力 ( $\tau^b$ ) がある値 ( $\tau^{pulse}$ ) 以下になると crack 状の破壊が起こり得ない事が示されている。本研究ではまず、F. H. のみを考慮に入れた数値シミュレーションを行いこの事を確認、また、理論的考察により、より強い必要十分な判別条件を導出した。しかし T. P. を考慮に入れた場合、1回のイベント中に温度や間隙圧が変化し続け、 $\tau_{ss}(V)$  なる関数を定義する事ができない。数値計算

の結果、このような場合には  $\tau^b < \tau^{pulse}$  の場合にも crack 状の破壊が得られる事、また破壊を起こすために与えた擾乱による温度、間隙圧の変化を考慮に入れる事により破壊様式の境界を説明できる事、擾乱の大きさに破壊様式が依存する事が明らかとなった。本結果は、破壊初期の状況がその後の大域的な破壊の様式に影響を与える事を示唆する物である。

### 論文審査の結果の要旨

プレート運動により引き起こされる地震は、断層で繰り返し発生している。従って、断層は準静的な応力蓄積のゆっくりとしたすべり状態から動的破壊伝播に至る非常に幅広い変位速度を経験している。しかしながら、このような広い変位速度に対する断層の摩擦構成則は未だ確立していない。本学位申請論文は、実験・理論・数値シミュレーションを駆使して、低速から高速に至る広い範囲の変位速度に対する断層摩擦構成則の構築に挑んだ、意欲的な研究である。

申請論文の内容は、1) 低速すべり実験、2) 高速すべり時の摩擦発熱による間隙圧の上昇 (Thermal pressurization, T. P.) と断層微視的接触部の閃光発熱 (Flash heating, F. H.) による摩擦低下のモデル化、3) 数値シミュレーションおよび解析的手法に基づく中速すべり (1mm/s~0.1m/s) における摩擦構成則の構築、4) 数値シミュレーションによる、高速すべり時における熱的弱化過程が動的破壊伝播様式に及ぼす影響の評価、である。

まず、実験であるが、滋賀県今津町に露出する花折断層露頭から、野外調査を行って採取した断層ガウジを用いて1) の摩擦実験と2) の摩擦発熱による間隙圧上昇計算に必要とされる水理定数の測定を行っている。1) においては、試験機の剛性も推定するパラメータに加える新たな手法を開発し、測定精度の向上を図っている点が独創的である。また、理論・シミュレーション研究者の多くは、実験や野外調査の経験が乏しいのが常であるが、申請者は、野外調査を行い採取した断層ガウジを手にも、自ら実験し、理論・シミュレーションを組み立てている点に大きな魅力を感じる。3) での、これまでなかった中速域での摩擦構成則構築の際に、申請者が見せた、熱活性型の滑り過程と F. H. を組み合わせるといふ断層摩擦への深い洞察、および高度な数値計算的、解析的手法には眼を見張るものがある。また、4) においても、動的破壊伝播計算に T. P. と F. H. を組み込み、破壊伝播様式に及ぼす影響を調べているが、これも問題に対する深い理解と非常に高度な数値計算技術に裏打ちされたものと評価できる。

4) における断層破壊伝播シミュレーションは、断層における微視的過程をモデル化したものであり、現段階では、実際の地震とはスケールが異なっており、まだ問題が残されている。しかしながら、申請者が試みた、広い変位速度に対する摩擦構成則構築への取り組みや、破壊伝播への T. P., F. H. の組み込みは、当該分野において世界トップレベルの研究業績と評価できる。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。