

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	中野 龍二
論文題目	Experimental Research on Rate- and State-Dependent Friction Constitutive Law Focusing on the Transient Change of Frictional Strength at Intermediate to High Slip Velocities		
(論文内容の要旨)			
Dieterich (1979) や Ruina (1983)らにより提案された速度状態依存摩擦構成則は、断層の固着時における強度回復過程やすべり速度に依存した定常摩擦の存在、すべり速度急変時に見られる摩擦の過渡応答などを見事に記述することから、地震サイクルのシミュレーション等において断層モデルに組み込まれ、利用されている。速度状態依存摩擦構成則は3種類のパラメーター a, b, Lで記述され、低速度条件下での摩擦実験の結果から、a, bはともに10^{-2}-10^{-3}、Lはμm のオーダーの値をとることが明らかになっている。しかしながらこれらの値を用いた摩擦構成則は、mm/sを超える中-高速条件における実験で近年明らかになってきた摩擦強度の著しい弱化現象を説明することができない。そのため、中-高速すべりの条件における断層すべり挙動を、摩擦構成則を用いて議論することができないという問題があった。本研究では、中-高速度域にて観察される弱化現象を説明できる摩擦構成則の記述を目的とした岩石摩擦実験を行い、速度状態依存摩擦構成則を中-高速度域における摩擦現象をも記述することのできる則に拡張することを試みた。 本研究ではまず、回転式摩擦試験機を用いて中-高速度域での速度一定実験、および速度ステップ実験を行った。試料として、ジンバブエ産の斑れい岩を使用し、垂直応力1.5 MPa、室温、室内湿度の条件下でそれぞれの実験を行った。その結果、速度一定実験において、$<200\text{ mm/s}$のすべり速度まではほぼ一定の定常摩擦係数値が得られたが、より高速の条件では、急激な定常摩擦係数の減少が観察された。200 mm/sを超える速度条件での速度ステップ実験の結果をLevenberg-Marquardt法を用いることで推定された構成則パラメーター a, b, Lの値は、それぞれ以下の傾向を示した。(1) aは、誤差を含めて<0.03の値をとり、すべり速度に依らずほぼ一定である。(2) bは、誤差を含めて<0.5の値をとり、すべり速度に対する依存性はほぼ見られない。(3) Lは、誤差を含めて$<0.3\text{ m}$の値をとり、すべり速度に対してほぼ線型的に増加する。本研究で得た中-高速度域条件の摩擦実験結果を、低速度域条件下にて行われた速度ステップ実験の結果と比較を行うことで、低速から高速まで、幅広い断層すべり速度に適用可能な速度状態依存摩擦構成則の各パラメーターを議論することが初めて可能となった。それらは、以下の特徴を持つ。(1) aは、すべり速度に依らずほぼ一定である。(2) bは、0.1-1 mm/sまではすべり速度に依らずほぼ一定であるが、この速度域を超えると急激に増加する。(3) Lは、低速からおよそ900 mm/sの高速まですべり速度に対してほぼ線型的に増加する。 次に、試料表面温度の摩擦係数の定常値に対する依存性を確認することを目的として、試料表面温度を変化させる実験を行った。その結果、摩擦係数の定常値について、中-高速度域条件下での実験から推定された試料表面温度に達しても、摩擦係数の			

定常値にほぼ変化が見られなかった。このことから、今回の試料について中-高速度域で観察された急激な定常摩擦係数の減少は、試料表面温度に起因するものではないことが示された。中-高速度域条件下での実験で観察された急激な定常摩擦係数値の減少は、Rice(2006)によるflash heatingに関する記述式により説明することができる。したがって、200 mm/sのすべり速度を境にflash heatingが起きている可能性が高い。

本研究で示した速度状態依存摩擦構成則のパラメーター b が著しく大きくなるすべり速度は、定常摩擦の大きさにflash heatingの影響が顕著に現れるすべり速度と大きく異なる。パラメーター b は0.1-1 mm/sを超えて増大するが、flash heatingは200 mm/sで影響が現れる。このことは、 b の値の高速域での特異な増加を説明するプロセスが、flash heating 以外の過程を含む可能性を示唆する。一方のパラメーター L については、実際の地震波を用いた解析からその値は m のオーダーになることが報告されているが、室内実験から推定される L の値は μm のオーダーであり、両者の間には数桁以上のギャップが存在する。これまで、 L の値の違いは、断層表面粗さのスケール則などを用いて説明されてきた。本研究で明らかになった L のすべり速度に対する依存性は、従来のスケール則による説明と異なる、全く新しい視点での断層弱化距離の解釈を与えるものである。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、地震性のすべり速度における断層摩擦構成則を記述することを目的として、岩石摩擦に関する実験的研究をおこなったものである。

地震は断層の急激なすべりにより発生する。地震発生過程を理解する上で、高速の断層すべりに伴う応力降下量と強度低下に至るすべり量などを予測することが重要であるが、すべり速度が数 mm/s を超えるような、いわゆる「中-高速域」と呼ばれる条件下における断層摩擦の性質の詳細は明らかになっていない。そのため、地震時の断層のすべり挙動を、実際の岩石の摩擦性質に基づいて議論することができない状況にあった。中野氏は、この地震科学における重要課題を解決することを目指した実験的研究に取り組み、(1) 回転式摩擦試験機を用いて、すべり速度が数100 mm/s を超える速度条件下でのすべり速度変化に対する摩擦の過渡応答解析に成功し、(2) 低速域の摩擦実験に基づいて記述された「速度状態依存摩擦構成則」の関係式を用いて、断層の中-高速摩擦特性を記述することが可能であることを示した。さらに(3) 速度状態依存摩擦構成則のパラメーター b および L が、滑り速度に対して顕著な依存性を有することを初めて明らかにした。

この研究成果により、断層の性質を低速から高速にいたる幅広いすべり速度域について統一的に記述することが可能になり、地震発生物理分野における重要な貢献となった。中野氏が明らかにしたことの中でも特に重要であるのは、従来すべり速度に依存しないと考えられてきた断層構成則パラメーター L がすべり速度に大きく依存し、中-高速すべり時において非常に大きな値を取りうることを示したことである。構成則パラメーター L は、地震時に断層が強度を失うまでに必要とするすべり距離に相当し、低速の摩擦実験で0.01～1 mm 程度の値が得られている。一方、兵庫県南部地震時の地震波記録の解析などから、天然の断層すべりにおいて L の値は0.1～1 m の大きさとなることがわかりつつある。このような数桁にもおよぶ、実験断層と天然の地震解析で得られる L の値の違いは、断層表面粗さのスケール則などを用いて説明されてきた。中野氏の明らかにした L の断層すべり速度に対する依存性は、従来のスケール則による説明と異なる、全く新しい視点での断層弱化解釈を与えるものである。

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、平成30年1月16日、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。

要旨公表可能日： 年 月 日以降