

氏 名	ひろ せ たけ ひろ 廣 瀬 文 洋
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2470 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 月 25 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	Experimental and Field Studies of Frictional Melting along Faults and Implications for Earthquake Generation Processes 断層沿いの摩擦熔融に関する実験および野外調査に基づく研究とその地震発生過程に対する意義
論文調査委員	(主 査) 教 授 嶋 本 利 彦 教 授 北 村 雅 夫 教 授 小 畑 正 明

論 文 内 容 の 要 旨

断層沿いに産出するシュードタキライト(細粒・緻密な脈状岩)の多くは、地震時の断層運動にともなう摩擦熔融によって形成されたと考えられている。構造地質学者は、地質時代に活動した断層がかつて地震を起こした証拠(地震の化石)として、長年この岩石に注目してきた。最近では、摩擦加熱が地震の発生に大きな影響を与える可能性があることから、シュードタキライトは地震学者からも急速に注目を集めるようになった。しかし、摩擦熔融が断層の力学的性質にどのような影響を与えるかは、明らかにされていなかった。本研究では、高速摩擦実験及びフィールド調査によって、断層の摩擦熔融に関与した物理的過程を明らかにし、摩擦熔融が断層の力学的性質に与える影響を評価することを試みた。

摩擦実験は、京都大学の回転式高速剪断摩擦試験機を用いておこなった。試料はガブロおよびモンゾ閃緑岩の円筒形試料(外径 25mm, 内径 15mm)を使用し、実験条件はすべり速度が 0.96-1.60m/s, 垂直応力が 1.25-2.19MPa, 156.8m 以下の変位量である。実験の結果、すべりの増加とともに 2 つの摩擦強度のピークと、各ピーク後にそれぞれすべり軟化(断層の強度を低下させ、大きな応力降下(地震)を引き起こす現象)が起こることが確認された。天然の断層沿いにみられるシュードタキライトは、第 2 のすべり軟化における熔融プロセスで形成されたと考えられ、大地震の一部は、このすべり軟化が引き金となって起こっている可能性がある。そこで本研究では、メルト層の形成に伴うこの第 2 のすべり軟化を詳しく調べた。

すべり軟化の間、母岩は断層沿いのメルト層で完全に分離しているため、断層の摩擦抵抗はこのメルト層の粘性率と剪断歪み速度によって決まることになる。そこで、剪断応力と剪断歪み速度からメルト層全体の粘性率を求め、さらに粘性剪断に対するメルト中の気泡と岩片の影響を既存の実験データ(Frith *et al.*, 1996; Lejeune *et al.*, 1999)を用いて補正し、メルトそのものの粘性率を求めた。その結果、すべり軟化の初期段階においてメルトの粘性率は 45 Pa・s から 145 Pa・s に急増し、その後、摩擦の定常状態に向かって 90 Pa・s まで減少することが判明した。粘性率が上昇するにも関わらず断層の摩擦抵抗が減少するのは、断層のすべりとともにメルト層が厚くなり、それによって剪断歪み速度が減少するからである。従って、メルト層の成長速度を規定する「岩石の熔融速度」が、摩擦熔融時のすべり軟化距離(地震の発生を規定する重要なパラメーター)を決めるもっとも重要な物理量であることが明らかとなった。

実験と天然のシュードタキライトを比較するために、スコットランド北西部の Outer Hebrides 断層帯において、約 70 日間、フィールド調査をおこなった。断層帯は、シュードタキライトの産状の違いに基づいて、1) 北部セグメント: マイロナイトとシュードタキライトの共存、2) 中部セグメント: 塊状で連続性のよいカタクレーサイト・シュードタキライト帯、3) 南部セグメント: 広範囲にわたって分布する脈状シュードタキライト帯、の 3 つに区分できる。本研究では、世界的にも稀な大規模シュードタキライト帯が露出している中部セグメントの South Uist 地域をとくに詳しく調べた。その結果、South Uist では、1) 最大約 50m の厚さに達する、塊状で無構造なシュードタキライト帯が、10km 以上にわたって連続的に分布していること、2) 小剪断帯もしくはブロック状のマイロナイトが、このシュードタキライト帯に沿って露出して

いること、3) シュードタキライトの一部が、緑色片岩相条件下でマイロナイト化していること、が明らかとなった。塊状シュードタキライト中には、角礫化したシュードタキライトや、複数の地震イベントを示唆する数多くの脈状シュードタキライトが顕著に観察されるが、連続性のよい明瞭な摩擦熔融ゾーンが認められない。このことから、厚いシュードタキライト帯は、熔融現象を伴う角礫化運動が同じ場所で幾度も起こることによって形成された可能性があり、このようなプロセスは本実験では再現できていないことがわかった。

南部セグメントの Barra 島で観察できる小規模なシュードタキライトは、実験で再現されたシュードタキライトと組織がよく似ている。このようなシュードタキライトから、測定可能なパラメーターと断層の力学的挙動の対応関係を知ることによって、地震時のすべり軟化距離を推測することが可能である。実験的研究から、これに使えるパラメーターとして摩擦熔融面のフラクタル特性と、変位とメルト層の厚さの関係の2つが有効であることがわかった。Sibson (1975) が測定した変位とシュードタキライトの厚さの関係は特に実験結果とよく似ており、この結果から、天然のシュードタキライト形成時のすべり軟化距離は数10cm のオーダーであったことが明らかになった。本研究によって、地震の発生過程において重要であるにも関わらず、決定することが非常に難しいすべり軟化距離を決める方法が開発されたことは極めて意義深い。

過去約20年間、地震から決まるすべり軟化距離 (10^{-1} - 10^0 m 程度) が通常の低速摩擦実験で決まる値 (10^{-5} - 10^{-4} m 程度) よりも数桁大きい原因が、研究者の間で大きな議論になってきている。ほとんどの研究者は、断層の表面形態のスケール効果をこの違いの原因であると考えてきた。摩擦熔融実験によって決定されたすべり軟化距離が、地震波の解析から得られる値とほとんど同じオーダーになることから、高速摩擦が地震の発生過程に大きな影響を与える可能性が高い。本研究により、従来、断層に固有の値であると考えられてきたすべり軟化距離が、発熱速度などによって大きく変化することが明確に示された。断層の変位そのものが断層の力学的性質を変えてしまうというこの非線形な現象を、さらに定量的に解析し、地震発生モデルに組み込むことが必要である。

論文審査の結果の要旨

シュードタキライトは断層沿いに産出する細粒・緻密な脈状岩であり、地震時の断層運動にともなう摩擦熔融によって形成されたと考えられている。構造地質学者は、地質時代に活動した断層がかつて地震を起こした証拠(地震の化石)として長年この岩石に注目してきた。最近では、摩擦加熱が大地震の「はじまり」のプロセス、大地震時の断層の動的挙動、大地震直後の断層の強度回復などに大きな影響を与える可能性が高いことから、シュードタキライトは地震学者からも急速に注目を集めるようになった。しかし、摩擦加熱が断層の力学的性質にどのような影響を与えるかは、詳しく研究されてこなかった。本研究において廣瀬文洋氏は、高速摩擦実験及びフィールド調査によって、摩擦熔融のプロセスと断層の力学的挙動の対応関係を明らかにすることを試みた。廣瀬氏はまず、回転式高速摩擦試験機を使ってガプロとモンゾ閃緑岩の高速摩擦挙動の全体像を明らかにし、さらに摩擦熔融に焦点をしばって、摩擦熔融のプロセスと断層の力学的挙動を対比する研究をおこなった。廣瀬氏は、研究の後半において、大規模シュードタキライトの産出でもっとも有名なスコットランドのアウトター・ヘブリーデス (Outer Hebrides) 諸島において約2ヶ月半の調査をおこない、実験結果と天然のシュードタキライトの比較検討をおこなった。廣瀬氏の研究成果は、以下の3点に要約できる。

(1) 摩擦熔融に伴う断層の強度低下の機構

地震は、断層がすべるとともに強度が低下し(断層の強度の「タガ」が外れ)、断層にかかった応力に耐えきれなくなつて発生する。この過程を記述する重要なパラメータは、断層の強度が低下し続ける軟化すべり量 (D_c ; slip-weakening distance) と強度低下量 (stress drop) であり、それらがわかれば、地震発生の過程を理論的・数値的に解析することが可能である。廣瀬氏は、摩擦熔融に伴うメルト層の成長とメルトの粘性率の変化を決定し、メルト層の成長とともに粘性率は急増すること(熔融に伴う潜熱などの影響)、それにも関わらず断層の強度が低下するのは、メルト層の厚さが増加してメルト層の剪断歪速度が低下することが要因であることを示した。メルト層が薄い時にはメルトは断層沿いに非常に移動しにくいことから、「岩石の熔融速度」がメルト層の成長速度、つまり D_c を決めるもっとも重要なプロセスであることが明らかになった。同氏はまた、 D_c は断層の物質定数ではなく、断層の変位速度、垂直応力などによって大きく変わることを多数のデータで示した (D_c は摩擦加熱速度の増加とともに顕著に減少する)。 D_c と強度低下量は、メルト層の厚さの変化と

メルト層内部の温度履歴によって決まり、摩擦熔融時の高速摩擦は、「断層のすべりそのものが断層の性質を決める」という強い非線形現象であることが明白となった。廣瀬氏の研究によって、モデル化が可能なほど、熔融のプロセスと断層の力学的性質の関係が明らかになった。

(2) 実験結果とアウター・ヘブリーデス諸島のシュードタキライトの比較

廣瀬氏は、アウター・ヘブリーデス衝上断層をほぼ全域（約 200km）にわたって調べ、この断層が、(i) マイロナイトとシュードタキライトの共存で特徴づけられる北部セグメント、(ii) 塊状で厚さが数 10m に達する大規模シュードタキライトとカタクレサイトが連続的に分布する中部セグメント（シュードタキライトは一部でマイロナイト化している）、(iii) 小規模な脈状シュードタキライトが広範囲に分布する南部セグメントに区分できることを明らかにした。同氏は、世界的にも稀な大規模シュードタキライト帯が露出しており、詳しい調査がおこなわれてこなかった中部セグメントの南ユイスト（South Uist）地域をとくに詳しく調べた。同氏はさらに、ほぼ全域から採取した断層岩の変形組織を顕微鏡下で調べた。その結果、摩擦熔融実験と非常によく似ているのは南部セグメントに属するバラ（Barra）島の小規模シュードタキライトであること、中部の大規模シュードタキライトは熔融現象を伴う大規模破碎が同じ場所で繰り返し起こって形成された可能性があり、このプロセスは実験ではまだ再現されていないこと、流動的変形と地震性断層運動が混在する北部の断層運動を理解するには、高温変形実験によって流動的な変形を再現する必要があることが判明した。

(3) 天然の断層についての D_c の決定

過去10年間以上も続いている議論は、地震から決まる D_c （数 100mm から 1m 程度）が通常の低速摩擦実験で決まる値よりも数桁大きいことの原因である。廣瀬氏は、フラクタル次元で定量化が可能な熔融面の形状変化、及びメルト層の厚さと変位の関係が D_c に対比できることを実験で示した。後者に非常によく似た関係が R. Sibson によって報告されており、実験的關係が適応できるとすると一連の小規模シュードタキライトに対して数 100mm の D_c が得られる。これは、天然の地震に対して求まる値と同じオーダーである。大半の研究者は、天然の断層と実験試料間のスケールの違いが D_c の違いのもっとも重要な原因であると考えてきたが、摩擦加熱の影響を考えることによって、地震学的に得られる D_c が説明できる可能性がある。

廣瀬氏が使用した高速摩擦試験機は他の機関ではほとんど使用されていないので、同氏の研究は摩擦熔融のプロセスを詳細に調べ、断層の力学的挙動との対応関係を明らかにした最初の研究である。その結果、地震の発生において重要なすべり軟化の過程が、モデル化が可能なほど明らかになった。同氏はまた、実験と天然の断層を比較することによって、実験で再現できたことと再現できなかったことを区別し、今後の研究課題を浮き彫りにした。

以上の研究結果を総合的に判断して、本論文が理学博士の学位取得に十分な内容をもつものと結論した。