

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02001

研究課題名(和文) 高速摩擦の知見に裏付けされたルミネッセンス断層年代測定法の確立

研究課題名(英文) Establishment of luminescence dating of faults proved by high-velocity friction experiments

研究代表者

大橋 聖和 (Ohashi, Kiyokazu)

山口大学・大学院創成科学研究科 准教授

研究者番号：70615525

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：ルミネッセンス年代測定法を用いた活断層の新しい活動評価手法を確立するため、室内で地震すべりを再現する高速摩擦実験を行い、ルミネッセンス信号強度(年代値に相当)の変化を系統的に調べた。その結果、断層が高速ですべることによって生じる摩擦熱によって、信号強度が減少する(年代リセットが生じる)こと、その発生場はある程度以上の地下(具体的には深さ約100～200m以上)に限られることが明らかとなった。これらの結果により、調査場所を適切に選ぶことができれば、ルミネッセンス年代測定法を用いて活断層の活動時期を特定することは可能だと結論づける。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は活断層の活動評価法に新たな手段を提供するものであり、この技術を社会実装することで、活断層の活動評価精度の向上が見込まれる。具体的には、(1)活断層の調査地点の選択肢を新たに増やす、(2)海洋底掘削や内陸断層掘削で得られたコア試料、基盤露出地域、地下空間など、上載地層を伴わない断層の活動時期に関する情報を与える、(3)炭素14年代測定法の適用困難な数万年前以前に活動した断層の活動時期に関する情報を与える、の3つが挙げられる。また、本手法は適用年代範囲が広いこと、数万～数10万年時間スケールの長期的なテクトニクス理解にも資するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to establish a new method for evaluating Quaternary fault activity using luminescence dating, we conducted high-velocity friction experiments that reproduce earthquake slip in laboratory and systematically examined changes in luminescence signal intensity (equivalent to age values). As a result, we found that the signal intensity decreases due to frictional heat generated during high-velocity slip of the fault. Normal stresses corresponding to a depth of approximately 100-200 m are required for age resetting to occur. Based on these findings, we conclude that it is possible to determine the timing of active faulting using luminescence dating if the survey site is appropriately chosen.

研究分野：地質学

キーワード：活断層 光刺激ルミネッセンス 摩擦発熱 地震性断層すべり 高速摩擦実験 断層ガウジ 加熱実験 断層帯掘削

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

断層が活動した時期の決定法として、断層と断層周囲の地層との切断関係を用いた「上載地層法(じょうさいちそうほう)」と、断層構成物質の絶対年代測定に基づく「直接年代測定法」の2つが存在する。直接年代測定法は、原理上、第四紀の地層の存在しない岩盤中の断層にも適用可能であることから、地下空間やボーリングコアなどに出現した断層の活動時期を特定できる新しい評価法として注目されてきた。特に石英や長石を用いたルミネッセンス年代測定法は、熱や破碎・摩擦といった断層内部で起こりうる作用が年代値のリセットを引き起こすことや、その適用年代範囲が数10年～数10万年と活断層の評価に最適なことから、活断層の直接年代測定法として期待されている。しかし、地震性断層運動の再現実験(いわゆる高速摩擦実験)に基づいた検証が不十分であること、断層内で起こりうるルミネッセンス信号変化の全体像と個々の素過程が包括的に理解されておらず、研究開始当初はまだ実用化への道筋が示されていないこと、具体的には、高速摩擦によって年代リセットが起こる地震学的・地質学的条件とその経験則が分かっていないこと、粉碎や摩擦など、断層内部で起こる熱以外の作用によってルミネッセンス信号がどのように変化するか等の全体像が分かっていないこと、地震発生時期の明らかな活断層での検証作業が不十分であること、の3つが課題であった。

2. 研究の目的

断層の最新活動時期の決定は、内陸地震・海溝型地震の発生評価、大型構造物の立地調査、変動帯の学術的理解などにおいて極めて重要な課題である。しかしながら、今日用いられている決定法は調査地と適用年代範囲が限定される点において万能ではなく、これを補う(もしくは上回る)手法が求められている。その候補として「ルミネッセンス年代測定法」が期待されているのが、室内実験に基づく手法の開発と検証が行われていないため、未だ実用できる段階にない。本研究では、最近10数年で飛躍的に進展してきた高速摩擦実験と地震時断層内現象の理解に基づいて地震地質学と地球年代学の知見を融合し、(1)地震に伴うルミネッセンス年代のリセット条件の決定、(2)断層運動に伴うルミネッセンス信号変化の包括的理解、(3)天然の断層における実践的検証、の3つを実施する。そして、「ルミネッセンス断層年代測定法」の確立を目指すことが最終目的である。

3. 研究の方法

(1) 高速摩擦実験を核とした年代リセット条件の決定と経験則の導出

本テーマでは、高速摩擦によって年代リセットが生じる地震学的・地質学的条件と、その経験則を室内実験から求める。断層における年代リセットの主要因は摩擦発熱であると予想されるが、その程度はすべり速度や垂直応力、断層を構成する鉱物種や間隙水の有無などに左右されるため、断層運動に伴ってリセットが生じるか否かのパターンは極めて複雑である。そこで、これらの条件を1条件ごとに多様に变化させた対照実験を行い、各因子の変化がルミネッセンス信号リセットの発生にどのように影響を与えるのかを明らかにする。また、実験中に測定した力学データから試料に与えた摩擦仕事量および仕事率を求め、この2つの物理量を指標とした定量的な年代リセット則を導出する。

(2) 断層運動に伴うルミネッセンス信号変化の包括的理解

断層内部で起こる現象は、摩擦発熱以外にも粉碎や摩擦などが存在し、それらがルミネッセンス信号にどのように作用するかを知ることは極めて重要である。なぜなら、粉碎や摩擦だけでリセットが起こってしまうならば、ルミネッセンス測定から発熱を伴うすべり(地震)と伴わないすべり(ゆっくりとしたすべり)を区別できないからである。そこで本テーマでは高速摩擦実験と同等の温度・時間条件において石英粒子に対して急速加熱実験を実施し、高速摩擦実験に伴うルミネッセンス信号変化が熱的作用のみで説明できるか否かを検証する。実験は偏光ゼーマン原子吸光光度計のグラフィット・ファーネスに改良を加えることで実施し、実験中の温度はサーモカメラで実測する。また、回収した石英粒子は、高速摩擦実験の回収試料と同様の手順でルミネッセンス信号を計測し、信号強度の変化および急速加熱実験に伴うルミネッセンス信号リセットのパラメータを求める。

(3) 地震地質学的知見に基づいた天然断層での実践的検証

本テーマでは、室内実験によって得られたルミネッセンス信号変化が天然の地震断層でも起こりうるのか(実際に過去に起こっていたのか)を検証するために、地震発生時期の明らかな活断層を対象とした試料の採取とルミネッセンス測定を行う。検証のテストサイトとして、地震発生時期、すべりの生じた箇所、すべり速度、地震時の垂直応力条件が分かっており、かつ断層帯の幅が狭く変形が集中している布田川断層帯を対象とする。また地表露頭におけるサンプリングに加えボーリング掘削を実施し、地下約100mからも断層試料を回収する。断層試料および母岩試料から長石を抽出してルミネッセンス測定を実施するとともに、試料の自然放射線測定および化学分析から年間線量を求め、断層帯の年代値およびそこから離れるに従い年代値がどの

ように変化するのか調べる。また、テーマ(1)、(2)で得られたリセット経験則や信号変化の素過程と照合し、天然の断層から室内実験と総合的な結果が得られるかどうかを検証する。さらに断層試料を出発物質として用いた高速摩擦実験を実施し、そのルミネッセンス測定を行うことで、実際の信号特性を説明可能かどうかの再現実験を行う。

4. 研究成果

(1) 地震に伴うルミネッセンス年代のリセット条件の決定

1-1. 過年度に花崗岩由来の石英を用いて実施した摩擦実験とルミネッセンス信号測定結果の再解析および取りまとめを実施し、高速摩擦に伴う石英ルミネッセンスのリセット条件の定量的な指標として、1. 単位面積あたりの摩擦仕事率、2. 垂直応力 (=深さ)、3. 断層内部の到達温度、が有効であることを明らかにした。またその結果をまとめ、国際誌に投稿した。一方、堆積物由来の石英であっても、花崗岩由来の石英と同様に高速摩擦実験に伴ってルミネッセンス信号がリセットされ、その条件もほぼ同じであることが明らかとなった。また、10秒以下のごく短時間の摩擦加熱であっても、ルミネッセンス信号の低下と加熱時間に相関関係があることが見いだされた。

1-2. 天然および模擬の断層物質を用いた摩擦実験では、実験時の垂直応力、含まれる粘土鉱物の量、および間隙水の有無が摩擦発熱の程度に大きな影響を与えることが明らかとなった。特に粘土鉱物の量が多く、水に飽和した断層では、摩擦発熱が著しく抑制され、垂直応力10 MPaを超える深部条件(地下約300 m以上)でもルミネッセンス信号のリセット条件に達しない可能性が示された。

(2) 断層運動に伴うルミネッセンス信号変化の包括的理解

急速加熱実験の実施に先立ち、高速摩擦実験で石英粒子が被った熱を、有限要素法を用いた計算および熱電対による実測で求めた。当初は有限要素法に基づく断層内温度の見積り結果を採用したが、この結果には不確実性があることが判明し、正確な温度見積りにはすべり面直近で熱電対による温度実測が必要であることが分かった。そこで、実験試料アSEMBリを改良することですべり面の表面を熱電対で実測できるように改良し、有限要素法による温度計算と照らし合わせ、正確な断層内温度と光刺激ルミネッセンス信号変化との関係性を得ることに成功した。得られた高速摩擦実験時の断層内温度と実験時間に基づき、加熱温度200~500℃、加熱時間3~75秒で、合計18パターンの短時間加熱実験を実施した。実験後試料のルミネッセンス測定の結果、全ての試料で部分もしくは完全リセットが起こっていることが明らかとなった。また、リセットを生じる温度・時間条件を短時間加熱実験と高速摩擦実験で比較したところ、ほぼ一致することが分かった。さらに、既存研究(長時間加熱実験)によって得られているトラップ寿命とも総合的な結果となった。これは、高速摩擦実験時の石英の信号変化の要因は熱そのものであり、長時間加熱時と短時間加熱時のカイネティクスに有意な違いがないことを示す結果である。

(3) 天然の断層における実践的検証

3-1. 2016年熊本地震を引き起こした布田川断層の地表露頭から断層試料(断層ガウジ、断層角礫)および非変形の母岩である阿蘇-4火砕流堆積物を採取し、含まれる長石のルミネッセンス年代を測定した。その結果、断層試料と母岩試料のルミネッセンス年代に有意な差は認められず、地表近傍の低封圧条件下では、長石のルミネッセンス年代のリセットに必要な摩擦発熱が得られない可能性が示された。地表近傍の低封圧条件下では石英のルミネッセンス年代がリセットされないことは申請者らのこれまでの室内実験で予想されていたが、これを裏付ける結果となった。また、露頭で採取した断層ガウジを用いた高速摩擦実験の結果、垂直応力0.5 MPaの低圧条件下では、地震に相当する1.0 m/sのすべり速度でも100℃程度しか発熱せず、長石のルミネッセンス信号にも顕著な変化は認められなかった。一方、地下約100 mに相当する垂直応力3 MPa下で実施した高速摩擦実験では、ルミネッセンス信号が顕著に減少することを明らかにした。信号強度は蓄積線量にして出発物質の1/3程度にまで減少し、年代値では出発物質の約90kaに対して約27kaへの若返りが認められた。

3-2. 布田川断層ボーリング掘削に関して、用地交渉、地元への説明、掘削位置・角度・掘削長などの精査を行い、業者との事前打ち合わせの上、掘削に着手した。計画通り、地下100 m付近で断層帯を貫通して掘削は完了した。コア試料の回収率はほぼ100%であり、複数の断層試料を回収することに成功した。また、ボーリング試料のコア柱状図作成および変形構造記載から、複数の阿蘇火砕流堆積物とそれを変位させる断層の存在が明らかとなった。年代測定は破壊分析であるため現在慎重に記載を進めており、ルミネッセンス年代測定の実施は研究期間内には完了しなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kiyokazu Oohashi, Yuki Minomo, Koji Akasegawa, Noriko Hasebe, Kazumasa Miura	4. 巻 125
2. 論文標題 Optically Stimulated Luminescence Signal Resetting of Quartz Gouge During Subseismic to Seismic Frictional Sliding: A Case Study Using Granite Derived Quartz	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2020JB019900
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020jb019900	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tsukamoto Sumiko, Guralnik Benny, Oohashi Kiyokazu, Otsubo Makoto, Tanner David, Brandes Christian, von Hagke Christoph
2. 発表標題 Direct dating of faults by luminescence and ESR: Case studies from Japan and Switzerland
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 蓑毛裕希, 大橋聖和, 長谷部徳子, 三浦知督
2. 発表標題 地震時に石英ガウジが光刺激ルミネッセンス(OSL)信号を消失する深度条件
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 蓑毛裕希, 大橋聖和
2. 発表標題 野島断層ポーリングコア試料の摩擦特性
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会（2019山口）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大橋聖和, 蓑毛裕希, 赤瀬川幸治, 長谷部徳子, 三浦知督
2. 発表標題 ルミネッセンス断層年代測定の確立に向けた基礎実験と現世付加体への適用可能性
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会(2019山口)(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sumiko Tsukamoto, Benny Guralnik, Kiyokazu Oohashi, Makoto Otsubo
2. 発表標題 Direct dating of faulting in the absence of overlying sediments
3. 学会等名 20th Congress of the International Union for Quaternary Research (INQUA)(国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長谷部 徳子 (Hasebe Noriko) (60272944)	金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授 (13301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	Leibniz Institute for Applied Geophysics	Leiniz University of Hannover	RWTH Aachen University	
デンマーク	Technical University of Denmark			
ドイツ	Leibniz Institute for Applied Geophysics			

共同研究相手国	相手方研究機関			
オランダ	Wageningen University			