

ルミネッセンス法による斜面崩壊の年代推定

小畑 直也¹⁾

要旨 斜面崩壊の年代推定に利用される手法を概観し、特にゼロリセットに注目したルミネッセンス法による年代推定方法を考察した。斜面崩壊による堆積物では、ルミネッセンス法におけるゼロリセット要件である熱、応力、露光の程度が満たされているとは限らず、得られた年代は過大評価されている可能性がある。しかし、石英のOSL信号は露光後数秒でリセットするため、露光した部分については斜面崩壊によってもリセットされることが期待できる。斜面崩壊の堆積物でも、少量の測定試料で行えるSAR法によってOSL測定した蓄積線量値の分布を確認することで、ゼロリセットの程度を検討することができ、年代を見積もることも可能である。また最後に、試料採取における、ルミネッセンス法特有の注意点を挙げた。

キーワード：ルミネッセンス年代測定, TL, OSL, 斜面崩壊, ゼロリセット

1. はじめに

近年、局地的集中豪雨や地震などによって頻発している斜面崩壊は、発生地域に甚大な被害をもたらしている(国土交通省, 2014)。最近10年間では土石流・地すべり・がけ崩れを合わせた斜面崩壊によって発生した土砂災害は、年間平均1,000件を上回る件数が発生しており、発生地域住民の生命の危機に直結する災害として、様々な対策が進められている(内閣府, 2014)。

斜面崩壊も他の自然災害と同様に、その対策の上では発生の頻度や間隔など「年代」に関する情報は重要である。しかしながら斜面崩壊に適用できる数値年代測定法は限られる。一般的な放射年代測定法の測定対象は、熱によって年代のゼロリセットに至った鉱物であるが、斜面崩壊によってリセット要件を満たすことは難しく、その年代学的検討は困難である。一方で、

ルミネッセンス法は熱条件以外に太陽光への露光も年代のゼロリセット要件となる数値年代測定法である。露光という堆積物の経験しやすいゼロリセット要件から、数十年～数十万年前の斜面崩壊の年代学的検討に用いることができる可能性がある。本稿では先行事例を概観しながら、ゼロリセットに注目したルミネッセンス法による斜面崩壊の年代推定方法を考察する。

2. 利用されている斜面崩壊の年代推定方法

斜面崩壊の発生年代を知る手段としては、層序から推定すること、崩壊によって生じた堆積物へ数値年代測定法を適用することが考えられる。

層序から推定する場合に鍵となるのは火山灰(テフラ)層である。テフラは広範囲に同時に堆積するため異なる地点間の層序の対比が可能であり、これまでに

得られた火山灰編年や数値年代などから、目的とする斜面崩壊の年代推定が可能である(町田・新井, 2003)。テフラの同定には、鉱物組成(全鉱物または重鉱物)、火山ガラスの形態、火山ガラスの屈折率、EPMAなどによる鉱物の化学組成などが利用されている。

数値年代の測定を試みる場合は、測定法によって対象とする鉱物(または元素)と、適応可能な年代範囲を検討する必要がある。斜面崩壊をはじめ数値年代を得る測定法として広く利用されている手法は、放射性炭素年代測定(^{14}C)法である。 ^{14}C 法は、有機試料中の ^{14}C 含有量が半減期 5730 ± 40 年で減衰していくことを利用した年代測定法である。加速器質量分析計(AMS)を用いて試料中の炭素同位体(^{12}C , ^{13}C , ^{14}C)を同時に測定することが一般的となっており、得られた ^{14}C 年代は、IntCal13(Reimer *et al.*, 2013)などのデータセットを使って暦年較正年代に変換される。同論文の水月湖のデータにより、日本でもおよそ5万年前までの高精度な測定が可能である。斜面崩壊においては、崩壊によって土砂とともに埋没した樹木や腐葉土などが主な測定対象となる。詳しくは、遠田ほか(2013)を参照していただきたい。

また、 ^{14}C 法と同様に埋没した樹木を測定対象とする年輪年代法も利用されている(箱崎, 2014)。年輪年代法は、樹木年輪の形成が気候の影響を受け、類似的な環境では年輪幅が共通の変化を示すことを利用している。埋没樹木の年代を得るには、あらかじめ現生木や年代既知の試料から標準パターンを作成しておく必要があり、スギではBC1313年、ヒノキではBC912年、コウヤマキではAD22年からAD714年までの標準パターンが作成されている(長友編, 1999)。年輪年代法で得られる年代は試料の最も外側の年輪が形成された時のものである。土砂によって埋没した樹木の場合は直前まで成長していた年輪、すなわち樹皮直下の最外年輪が残っていると期待でき、斜面崩壊の年代を精度よく推定できると考えられる。最近では、樹木セルロースの酸素同位体比を利用した方法も開発され、年輪幅を使用した方法を飛躍的に拡大させた(中塚・佐野, 2014)。

しかしながら、これらの年代測定法では、地層中にテフラや測定対象となる樹木や炭化物が含まれている必要があり、目的とする現場で必ずしも年代が得られるとは限らない。崩壊によって二次的に混在したものを測定対象とするため、慎重な原位置の確認も必要であり、もしも崩壊による堆積後に再移動した場合は古い年代を示すことになる。また、上記のとおり測定可能年代は比較的新しい範囲に限られる点も、場合によっては制約となりうる。より古い範囲の年代測定法

としては例えばカリウム-アルゴン(K-Ar)法がよく知られているが、一般的に用いられるスパイクを用いた同位体希釈法が得意とするのは、年代が数十万年よりも古い試料である。さらにK-Ar法においては、地すべりによって年代がリセットするのかは不明である。

以上のような状況の中で、年代学的には「数十年～数十万年」という測定可能領域を持ち、崩壊によって二次的に生じた痕跡ではなく直接堆積物を測定できる年代測定法として、電子スピン共鳴(ESR)法や次に紹介するルミネッセンス法が注目されている。

3. ルミネッセンス年代測定法

ルミネッセンス法は放射線による作用によって、結晶中において正孔と対になった電子が、結晶中の不純物中心などに捕獲され、準安定状態で蓄積した量を測定して年代を求める方法である。この準安定状態にある捕獲された電子は加熱により高温状態に置かれる、もしくは光による刺激を受けると励起されて正孔と再結合することでルミネッセンスを発生し、蓄積したエネルギーがリセットされる。一度リセットされた結晶は再び電子を蓄積しなければ発光しないため、鉱物のルミネッセンス発光量を測定すれば、鉱物がそれまで浴びてきた放射線量(蓄積線量)を知ることができる。さらに、鉱物へ照射された一年間あたりの放射線量(年間線量)を求め、蓄積線量を年間線量で割ることによって年代に換算できる。ルミネッセンスは捕獲された電子の励起方法によって区分され、加熱による熱ルミネッセンス(Thermoluminescence; TL)と、光の照射による光ルミネッセンス(Optically stimulated luminescence; OSL)が年代測定に利用されている。ルミネッセンス法で測定対象となる鉱物は放射線量に対してほぼ比例的に電子が蓄積する性質を持ち、かつ強固な結晶を持ち合わせるものであり、石英や長石が最適である。石英や長石は地表付近に普遍的に存在する鉱物であるため、ほぼすべての堆積物を年代測定の対象とすることができる。一般的にTL法はテフラの噴出、土器の焼成、焼石や焼土などの被熱、OSL法は風成・水成堆積物の堆積年代を得ることができ、年間線量にも左右されるが数十年前から数十万年前における年代決定を得意としている。

なお、ルミネッセンス法の詳細は、長友編(1999)、塚本・岩田(2005)、奥村・下岡(2011)などに記載されている。また、最近の研究例については月刊地球号外62号(下岡ほか編, 2013)に掲載されているので、

そちらをご覧ください。

3. 1. 斜面崩壊によって形成された堆積物のルミネッセンス年代

ルミネッセンス年代測定法において年代のリセットとなる刺激には、熱、応力、光などがあるが、斜面崩壊の年代を得るためのゼロリセットイベントとしては、(1) すべり面の摩擦による加熱、(2) すべり面の応力、(3) 崩壊から堆積するまでの露光、が期待できる。

(1) すべり面の摩擦による加熱と (2) すべり面の応力については地すべりが想定されるが、断層の活動性評価と同様の考え方で、すべり面に形成された破砕物質を TL 法によって測定するものである。しかしながら ESR 法などで論じられる通り (例えば、福地, 2003)、TL 法の場合も熱や応力によるリセットは条件が厳しく (例えば、高島・張, 1998; 平賀・吉田, 2000)、得られた年代が必ずしも最新活動年代を示すとは限らない。なお、鴈澤ほか (2013) は、断層ガウジから抽出した石英について、TL よりも熱的に容易にゼロリセットされる OSL のリセット条件を検討し、歴史的に既知の活動年代と標準偏差誤差内で一致した年代を得ている。

最も期待できる場合は (3) 崩壊から堆積するまでの露光であり、OSL 法によって測定する。ゼロリセットの考え方は風成・水成堆積物を対象とした通常の OSL 測定と同じである。しかし、河川堆積物で見られるように (白井ほか, 2008) 露光の程度には注意が必要であり、崩壊の状況によっては露光の継続時間が

短かったり、露光されない粒子が混在したりする可能性がある。特に地すべりのように大きな塊のままに動いた場合は全体の露光が期待できない。露光の不十分な粒子が混在したものを測定した場合、蓄積線量は過大に評価されるため、得られる OSL 年代は崩壊の年代よりも見かけ上高く見積もられることになる。このことは OSL 測定の重大な弱点であった。この混在に関しては、Single aliquot regenerative-dose (SAR) 法 (Murray and Wintle, 2000) への蓄積線量の評価方法の発達によって改善がみられている。従来から行われている複数の試料皿から 1 つの蓄積線量を求める Multiple aliquot additive dose (MAAD) 法 (Aitken, 1985) に対して、SAR 法では 1 つの試料皿の測定によって蓄積線量を求めることができる。MAAD 法では 1 つの測定値に対して多くの試料が必要であるため、ゼロリセットの程度が異なる試料では混在した粒子をまとめて測ることになり、平均化した見かけ上古い蓄積線量が得られることになる。一方、SAR 法では 1 つの測定値に対する試料量が少ないことから、混在の影響を相対的に小さくすることができる。さらに、一度の測定に使用する粒子数を減らし、SAR 法によって見積もられた蓄積線量の分布を検討することによって混在の影響を検討できる。すなわち、露光が十分な粒子のみからなれば蓄積線量は正規分布を示し、露光が不十分な粒子が混在していれば幅の広い分布を示すこととなる (図 1)。混在している場合は、その分布から一定の割合や閾値を設定して、露光が十分な蓄積線量のみを抽出し、年代を評価することができる。なお、この時の測定に使用する粒子数は極力少な

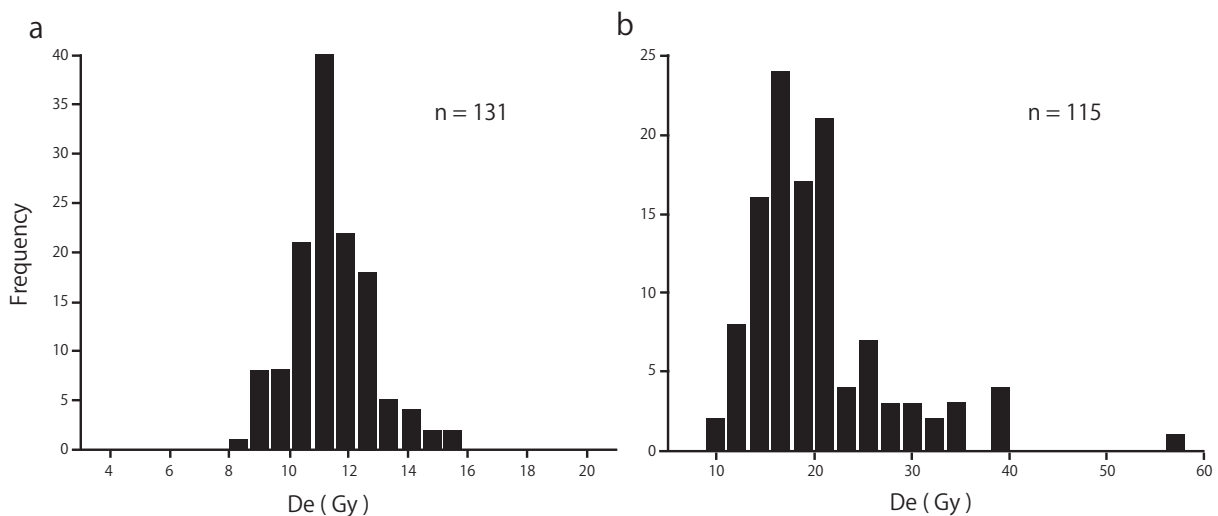


図 1 露光の程度による蓄積線量分布の例 (Fuchs and Lang, 2009 を改変)

a は露光が十分であったため正規分布を示し、b は露光が不十分であったため見かけ上高い蓄積線量にも分布が見られる。

くした方が混在の有無を正確に見積もることができるため、究極的には1粒子 (Single grain) から蓄積線量を見積もることがよい。しかし、複数粒子 (数 mg) を使用した通常の測定よりもルミネッセンス強度が小さくなりバックグラウンドの影響を受けやすくなるため、測定はシングルグレインに特化した装置でなければ難しい。

SAR 法によって蓄積線量の分布を確認する場合の欠点は、測定点数に応じた時間が多く必要なことである。これは、蓄積線量の評価に通常十数点程度の測定を行うのに対して、分布を見る場合は百点以上の測定が必要なことに起因する。なお、長石の安定した信号を用いた赤外光による OSL (post-IR IRSL; Thomsen *et al.*, 2008) は 10 万年を超える年代に対しても有効であり近年盛んに研究されているが、斜面崩壊の測定には長石よりも石英を用いることが良いと考えられる。石英の OSL は数秒程度の露光でゼロリセットが完了する (Godfrey-Smith *et al.*, 1988) ため (図 2)、露光が不十分な粒子の影響を小さくすることができる。しかし、石英の起源によっては光によってゼロリセットされやすい OSL (一般に fast 成分と呼ばれる; Jain *et al.*, 2003) が無いこともある。その場合は Tsukamoto *et al.* (2007) によると、OSL 信号の寿命が短いことと異常な減衰が生じることによって年代を過小評価することになるため、注意が必要である。

なお、斜面崩壊の年代そのものを測定するわけではないが、斜面崩壊による堆積物の上下層の OSL 測

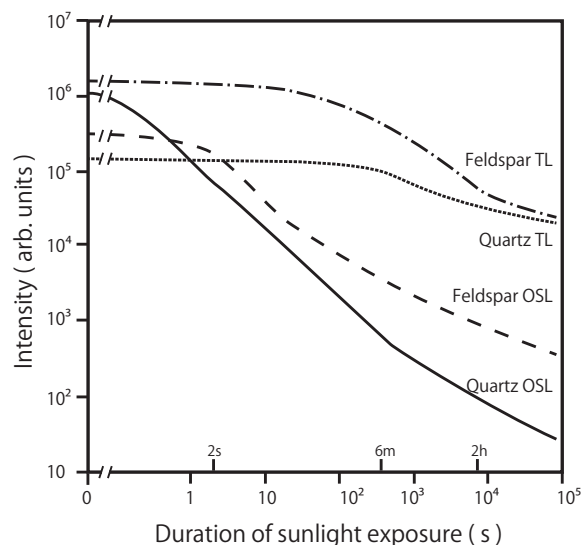


図2 太陽光による石英と長石のルミネッセンスのリセット (Godfrey-Smith *et al.*, 1988 を改変)。OSL の信号は TL よりも早くリセットされる。また、石英の OSL は長石の OSL より早く減衰し、太陽光への露光数秒後には十分にリセットしたとみなせる。

定も年代範囲を狭める有効な方法である (Chen *et al.*, 2008)。また、崩壊によって河川が塞がれて生じた天然ダムの底の堆積物を測定できる場合もある (Dong *et al.*, 2014)。

3. 2. ルミネッセンス年代測定適用時の注意点

今後、斜面崩壊のみならず、より広い分野、およびより多くの試料についてルミネッセンス年代測定が応用されていくと考えられる。ルミネッセンス年代測定の分析者以外にとって、ルミネッセンス年代測定に取り組む上で、はじめに問題となるのが試料採取であると思われる。そこでルミネッセンス法特有の注意点をいくつか挙げる。

蓄積線量測定用の試料採取においては、露光を避けた状態で採取しなければならない。目的とする試料が露頭として現れている場合は、露頭 (試料採取箇所) を暗幕で遮光し採取する方法や、露頭に遮光できるステンレスや塩化ビニルのパイプを打ち込む方法が取られることが多い。露頭が現れていない場合でも、ボーリングコア試料から必要最低限の試料を採取することもできる (例えば、伊藤ほか, 2013)。また、採取した試料は遮光、密閉した上で、暗所で保管する方がよい。

ルミネッセンスの測定において必要な試料量は測定方法や試料粒径によって左右される。現在一般的に行われている SAR 法による蓄積線量評価では 1 回の測定に必要な試料量は数 mg である。しかし、試料ごとに複数回測定し統計処理すること、測定条件の設定や精度良く測定できているのか確認するためのプレヒートプラトーテストやドーズリカバリーテスト (Wintle and Murray, 2006) などを行う必要があるため、処理後の石英や長石が最低 100mg 程度あることが望ましい。MAAD 法の場合は最低 500mg 程度必要である。よって試料採取量は、含まれる鉱物種や粒径によるが、最低でも 1kg 程度は必要となる。なお、年間線量測定用試料の必要量も測定方法によって異なるが、露光の有無は問わない。蓄積線量測定用に採取した試料のうち表面露光部を転用することも可能であり、処理前の蓄積線量試料そのものを使用してもよい。Ge 半導体検出器を用いた γ 線スペクトル測定を行う場合は乾燥重量で数十 g 必要となるため、握り拳 1 つ分程度採取しておくことが望ましい。ICP-MS によって測定する場合は乾燥重量で 1g 程度あれば測定可能である (郷津, 2013) が、年代測定のためには試料採取箇所周辺の平均的な年間線量を測定する必要があるため、年間線量測定用試料は、試料採取地点を含む上下 30cm を目安に、一定の領域から採取し、粉末化することが

肝要である。

年間線量評価では、ウラン、トリウム、カリウムの含有量を元素分析によって求めた後、含水比による補正をする必要がある (Aitken, 1985)。補正には、あらかじめ重量を測定しておいた試料を完全に乾燥させ (110°C で 1 ~ 3 日間など)、含有していた水分量を乾燥試料重量で除して求めた含水比を、 α 線、 β 線、 γ 線それぞれの線質ごとに異なる係数を加味して使用する。試料採取時の含有水分量が堆積時より一定であると仮定して使用するため、採取後に年間線量測定用試料が乾燥しないようにする必要がある。また、採取後直ちに年代測定することが難しい場合や、後に年代測定する可能性がある場合は、密封できる袋などに試料を入れておく必要がある。

4. おわりに

石英や長石を対象とすることや、OSL のように露光によってリセットするなどの特徴を生かす研究を概観しながら、ルミネッセンス法の斜面崩壊への適用方法を検討してきた。現在のところ、簡便な手法は見出されていないが、リセットの程度を詳細に検討することで斜面崩壊の年代を直接測定することが可能である。

ルミネッセンス法そのものについては 1960 年代の TL 年代測定の開始以来研究が続けられ、1980 年代の OSL 法の開発、2000 年代の SAR 法による蓄積線量評価法の発展によって堆積物の年代測定法として定着してきている。斜面崩壊の年代学的検討に用いられるなど、応用的な適用例も増えてきている。一方で国内の試料は堆積環境の複雑さから、ヨーロッパなど堆積状況の安定した地域の研究例をそのまま導入し難い点や、国内に継続して研究を行える研究室が少ないこと、従事する人員の不足などにより十分な測定が行えているとは言いがたい。測定を請け負える企業が非常に少ないことも、解決しなければならない問題の一つである。他の年代測定法ともクロスチェックを行い、社会的な需要に広く応えられるよう今後も研究を継続していくことが必要である。

謝辞

本稿を作成するにあたって、立正大学の岡岡順直博士には文献の紹介と有益なご意見を頂いた。また、岡山理科大学の板谷徹丸教授、株式会社蒜山地質年代学研究所の郷津知太郎博士の査読によって本稿は改善された。記して感謝申し上げます。

引用文献

- Aitken, M. J. (1985) Thermoluminescence dating. Academic Press, London, 359p.
- Chen, J., Li, X. and Yang, Z. (2008) Baota landslide in the Three Gorges area and its OSL dating. *Environmental Geology*, **54**, 417-425.
- Dong, G., Zhang, F., Ma, M., Fan, Y., Zhang, J., Wang, Z. and Chen, F. (2014) Ancient landslide-dam events in the Jishi Gorge, upper Yellow River valley, China. *Quaternary Research*, **81**, 445-451.
- Fuchs, M. and Lang, A. (2009) Luminescence dating of hillslope deposits-A review. *Geomorphology*, **109**, 17-26.
- 福地龍郎 (2003) ESR 法による断層活動年代測定 - その原理と実践 -. 深田研ライブラリー no. 63, 財団法人深田地質研究所, 45p
- 鴈澤好博・高橋智佳史・三浦知督・清水 聡 (2013) 光ルミネッセンスと熱ルミネッセンスを利用した活断層破砕帯の年代測定法. 地質学雑誌, **119**, 714-726.
- Godfrey-Smith, D. I., Huntly, D. J. and Chen, W. H. (1988) Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extracts. *Quaternary Science Reviews*, **7**, 373-380.
- 郷津知太郎 (2013) 断層岩の ESR 年代測定 - 最新活動年代の検討と年間線量決定のための工夫 -. 地質技術, no. 3, 27-30.
- 箱崎真隆 (2014) 埋没林でのケース・スタディーからみた日本の年輪年代学研究の現状と展望. 月刊地球, 号外 no. 63, 96-105.
- 平賀章三・吉田有香子 (2000) 最新断層活動時におけるパレオドーズゼロイング度の定量的評価 - 微粒子法の初適用 : 野島地表地震断層の場合 -. 奈良教育大学紀要, **49**, 37-45.
- 伊藤一充・長谷部徳子・柏谷健二 (2013) 湖沼堆積物のルミネッセンス年代測定とその問題点. 月刊地球, 号外 no. 62, 37-43.
- Jain, M., Murray, A. S. and Bøtter-Jensen, L. (2003) Characterisation of blue-light stimulated luminescence components in different quartz samples: implications for dose measurement. *Radiation Measurements*, **37**, 441-449.
- 国土交通省 (2014) 平成 25 年の土砂災害. http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h25dosha/H25dosyasaigai_matome3.31.pdf, 2014/7/22.
- 町田 洋・新井房夫 (2003) 新編火山灰アトラス [日本列島とその周辺]. 東京大学出版会, 東京, 336p.
- Murray, A. S. and Wintle, A. G. (2000) Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, **32**, 57-73.
- 長友恒人編 (1999) 考古学のための年代測定学入門. 古今書院, 東京, 161p.
- 中塚 武・佐野雅規 (2014) 酸素同位体比を用いた新しい木材年輪年代法. 月刊地球, 号外 no. 63, 106-113.
- 内閣府 (2014) 平成 26 年防災白書. 310p.
- 奥村 輔・下岡順直 (2011) ルミネッセンス年代測定を開始

- するための心得－日本における年代研究の現状－. 地質技術, no. 1, 5-17.
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., Buck, C. E., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Haflidason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T. J., Hoffmann, D. L., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kaiser, K. F., Kromer, B., Manning, S. W., Niu, M., Reimer, R. W., Richards, D. A., Scott, E. M., Southon, J. R., Staff, R. A., Turney, C. S. M. and van der Plicht, J. (2013) IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, **55**, 1869-1887.
- 白井正明・塚本すみ子・近藤玲介 (2008) OSL 強度より推定する現世河川堆積物中の長石粒子の露光状況と運搬-堆積過程. 第四紀研究, **47**, 377-389.
- 下岡順直・山田和芳・奥野 充編 (2013) 第四紀研究における年代測定法の新展開:最近 10 年間の進展－(II)放射線損傷年代・放射年代－. 月刊地球, 号外 no. 62, 206p.
- 高島 勲・張 文山 (1998) 秋田県鹿角市澄川温泉で発見された活断層／地すべり面の熱ルミネッセンス年代. 秋田大学工学資源学部素材資源システム研究施設報告, **63**, 109-112.
- Thomsen, K. J., Murray, A. S., Jain, M. and Bøtter-Jensen, L. (2008) Laboratory fading rates of various luminescence signals from feldspar-rich sediment extracts. *Radiation Measurements*, **43**, 1474-1486.
- 遠田晋次・小俣雅志・丸山 正・早瀬亮介・郡谷順英 (2013) 断層活動年代推定における 1 問題点－木片類と土壤有機物の ^{14}C 年代値の系統的ギャップ－. 月刊地球, **35**, 544-557.
- 塚本すみ子・岩田修二 (2005) ルミネッセンス年代測定法の最近の進歩－適用年代の拡大と石英の OSL 成分について－. 地質学雑誌, **111**, 643-653.
- Tsukamoto, S., Murray, A. S., Huot, S., Watanuki, T., Denby, P. M. and Bøtter-Jensen, L. (2007) Luminescence property of volcanic quartz and the use of red isothermal TL for dating tephtras. *Radiation Measurements*, **42**, 190-197.
- Wintle, A. G. and Murray, A. S. (2006) A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements*, **41**, 369-391.