

## ルミネッセンス法による被熱履歴推定の概要

小畑 直也<sup>1)</sup>・下岡 順直<sup>2)</sup>

**要旨** ルミネッセンス年代測定研究においてタイムゼロイングが不十分な場合は年代の過大評価につながるため、リセット現象そのものをルミネッセンス法によって研究することも行われている。TLのリセット要件となる被熱については、被熱の有無の判別や温度推定が可能である。ここでは、TLグローカーブの形状を観察し、主に被熱の有無について判定する方法を「TLグローカーブ形状法」、TL信号の感度変化を観察し、主に被熱温度を推定する方法を「TL感度変化法」、IRSL信号の感度変化を観察し、主に被熱温度を推定する方法を「IRSL感度変化法」と呼称し、それぞれの方法の手順を紹介した。実際の測定例として考古遺跡から得られた焼土に対してTLグローカーブ形状法とIRSL感度変化法を適用し、500℃程度の熱を受けた焼土であると推定した例を併せて紹介する。

キーワード：被熱履歴推定, 被熱温度, 熱ルミネッセンス (TL), 赤外光ルミネッセンス (IRSL), リセット

### 1. はじめに

株式会社蒜山地質年代学研究所では、現在新たな年代測定業務としてルミネッセンス年代測定の本格運用の準備を進めている。ルミネッセンス年代測定法は、地表に普遍的に存在する石英や長石を測定対象とし、数十年から数十万年前までの年代決定を得意とする年代測定法である。ルミネッセンス年代測定法には、熱ルミネッセンス (Thermoluminescence; TL) と光ルミネッセンス (Optically stimulated luminescence; OSL) があり、今日ではOSL法 (Huntley *et al.*, 1985) が、堆積物の埋没した年代を得る手法として広く知られている。ルミネッセンス法の運用により、弊社創立以来の主力業務であるK-Ar法と併せて、幅広い年代範囲のデータを提供できると期待される。

ルミネッセンス年代測定を行うにあたって、確度ある年代を得るには対象とする試料が年代のリセット要件を満たしていることが重要である。ルミネッセンス年代測定法では年代のリセットをタイムゼロイングと呼び、その要件として、OSL法では堆積時に十分露光すること、TL法では試料が400~500℃以上に加熱されることが必要である。タイムゼロイングが不十分な場合は年代の過大評価につながるため、リセット現象そのものをルミネッセンス法に

よって研究することも行われてきた。特にTL信号は試料が受けた加熱、すなわち「被熱」の特徴を検討する分析や、地質温度計も含めた温度情報に関する分析にも応用されている。本稿ではルミネッセンス現象を用いて、主に考古試料を対象とした被熱履歴推定法について、その手順と測定した事例を紹介する。

### 2. ルミネッセンス年代測定法の概要

被熱履歴推定法について紹介する前に、ルミネッセンス年代測定法について概説する。具体的な手順に関しては、Aitken (1985; 1998), 長友 (1999), 塚本・岩田 (2005) などに詳しい。

ルミネッセンス年代測定法は、鉱物が吸収・蓄積した自然放射線量を加熱や露光によって生じるルミネッセンス発光量から求める、放射線計測に基づいた年代測定法である。年代測定に用いる鉱物に蓄積した放射線量は、加熱や露光によって一旦タイムゼロイングされた後に、再び自然放射線を浴びることで吸収された放射線量である。吸収した放射線量に比例する形でルミネッセンスの発光量は増加するが、蓄積する放射線量には限度がある。ルミネッセンス信号が一定強度以上にならないほど放射線量を蓄積して

いる状態は飽和状態であり、古い年代サンプルの測定限界の一要因である。鉱物が吸収した放射線量の総量が蓄積線量であり、それは試料処理して得られた鉱物を加熱または光の照射によって発光させた時のルミネッセンスの強度から求める。蓄積線量の測定には、およそ100 $\mu\text{m}$ の石英粒子を用いる粗粒子法と、4~11 $\mu\text{m}$ の鉱物粒子を用いる微粒子法によって処理した試料を使用する。試料処理方法は奥村・下岡(2011)に詳しい。また、鉱物が1年間あたりに吸収する放射線量が年間線量であり、周辺の放射性同位元素、U、Th、Kの含有量から換算する方法と、TL線量計素子などを用いて測定する方法がある。年代への換算は、蓄積線量を年間線量で除することによって行う。

今日ではTL法よりもOSL法の方がよく知られているように感じられることもあるが、これはOSL法が堆積物に広く適用できることに加え、単試料再現(Single aliquot regenerative-dose; SAR)法による蓄積線量評価(Murray and Wintle, 2000)によって測定精度が向上し、5~10%程度の誤差で年代が議論できるようになったことも要因であろう。さらに、OSL法は加熱された試料についても適用可能であることも挙げられる(例えばBaillif and Holland, 2000など)。OSL法は励起光の種類によって区別され、主に石英を青色光で励起するものを単にOSLとし、長石を赤外光で励起するものを赤外光ルミネッセンス(Infra-red stimulated luminescence; IRSL)と呼んでいる。ゼロイングが完全であれば、得られる年代は石英や長石の埋没年代である。

一方、TL法ではより詳細な被熱年代を得ることができる。TL年代測定研究は1960年代に始まっており、OSL法よりも歴史がある。国内では東村・市川らのグループによってTL研究が開始され(Higashimura *et al.*, 1963)、広島原爆線量測定とともに考古学分野に寄与する形で研究が進んできた(市川, 1968など)。奈良教育大学古文化財科学研究室は、1962年以来、日本国内におけるルミネッセンス研究の草創期から研究を継続してきた研究室であった。これまでに古文化財科学研究分野において、土器や焼土、焼石などの考古遺物や考古遺跡を形成している堆積物やその鍵層となるテフラなどを対象とした研究が行われており、筆者らも在学当時より年代学的調査研究を行ってきた(例えば長友ほか, 2010; Shitaoka *et al.*, 2012; 下岡, 2013; 下岡ほか, 2013)。なお、本稿で紹介する被熱履歴推定法も、奈良教育大学古文化財科学研究室で開発された手法の流れを汲んでいる。

### 3. 被熱履歴推定の方法

ここでは被熱履歴推定法のうち、TLを用いた被熱の有無の判定法と、TLまたはOSLを用いた被熱温度推定法を紹介する。TLグローカーブの形状を観察し、主に被熱の有無について判定する方法を「TLグローカーブ形状法」、TL信号の感度変化を観察し、主に被熱温度を推定する方法を「TL感度変化法」、IRSL信号の感度変化を観察し、主に被熱温度を推定する方法を「IRSL感度変化法」と呼称す

る。いずれの方法においても比較対照試料として、同じ地点から採取し、かつ被熱していない試料があると良い。これは被熱していない試料を被熱試料と同様に測定して比較するためであり、その目的から、被熱履歴以外の特性が可能な限り同じ試料同士を比較することが望ましい。特に、比較対照試料を一度被熱させてからその温度が推定温度として再現できるかを確認することは、被熱試料の測定結果の検証になり有効な手段である。測定には、年代測定と同様に石英粗粒子法または、微粒子法によって処理した試料を供する。

#### 3.1. TLグローカーブ形状法

TL強度を測定温度の関数としてプロットした図をTLグローカーブと呼ぶ。TLグローカーブ形状法とは、過去にTL信号のタイムゼロイングがなされていたか否かを評価することで、被熱の有無を判断する方法である。TL年代測定における、付加線量法によって蓄積線量を評価する場合と同様の測定であり、手順は以下の通りである。

- (1) 年代測定と同様に暗室にて試料処理を行う。石英粗粒子を抽出するのが最適であるが、サンプル量が少ない場合や十分な量の石英が含まれていない場合は微粒子試料でもよい。
- (2) 処理済み試料(ナチュラル; N)を複数個、最低でも3つに取り分ける。
- (3) 付加線量法と同様に、処理済み試料のうち1つはNのTL強度を見るために残し、その他のN試料に放射線を付加照射する。一般に、放射線の付加は試料ごとに線量が等差的に増えていくように行う。
- (4) 手順(3)の試料をTL測定する。照射直後に測定すると、100 $^{\circ}\text{C}$ 付近に見られるTLまで検出してしまうため、50 $^{\circ}\text{C}$ の恒温槽に数日置くか、測定前に200 $^{\circ}\text{C}$ 程度までの加熱処理(プレヒート)を行っておく。

被熱の有無の判定は、まず付加線量の異なるTLグローカーブの重なりを確認する(図1)。ここで、通常400~500 $^{\circ}\text{C}$ 付近までの測定温度範囲においてTLグローカーブが重なれば、TL信号が飽和している状態と考えられ、タイムゼロイングを生じさせるほどの被熱は無かったと判断する(市川・萩原, 1978; 長友ほか, 2007)。低温側ではグローカーブが重ならないものの高温側で重なった場合は、重なった温度では被熱していないと考えられる(橋本ほか, 1994)。ただし、TL信号の熱的な寿命の観点から、200~300 $^{\circ}\text{C}$ 付近はTL信号が減衰している可能性もあるため、300 $^{\circ}\text{C}$ 以下は評価の対象にしない。放射線の付加照射量に比例してTL強度が大きくなっていれば被熱していると判断できるが、年代測定と同様に蓄積線量を求めると、被熱の程度も判断しやすい(奥山・長友, 1998)。予想される蓄積線量と比較し、妥当な値であれば400~500 $^{\circ}\text{C}$ 以上の被熱が想定され、明らかに過大評価された値であっても、程度によって被熱の状態を推定できる。

また、温度ごとに等価線量(ED)を評価しプラトーとなった領域で解析する。EDプラトー解析が有効な場合もある(長友ほか, 2003; 2007)。通常はNのTL強度に対して付加照射線量のTL強度が安定して増加する温度領域を

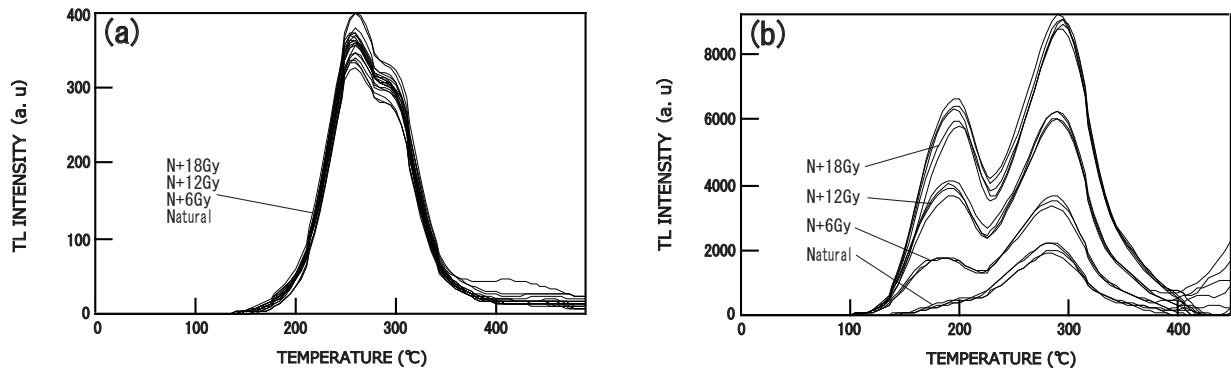


図1 TL グローカーブ形状法による被熱履歴測定例（長友ほか，2007 を改変）  
 (a) は焼けていない石の TL グローカーブ。N と付加照射した試料の間に TL 強度の差が無い。(b) は被熱している石の TL グローカーブ。高温まで TL 強度が線量に応じて増加している。タイムゼロイングに十分な加熱を受けている。

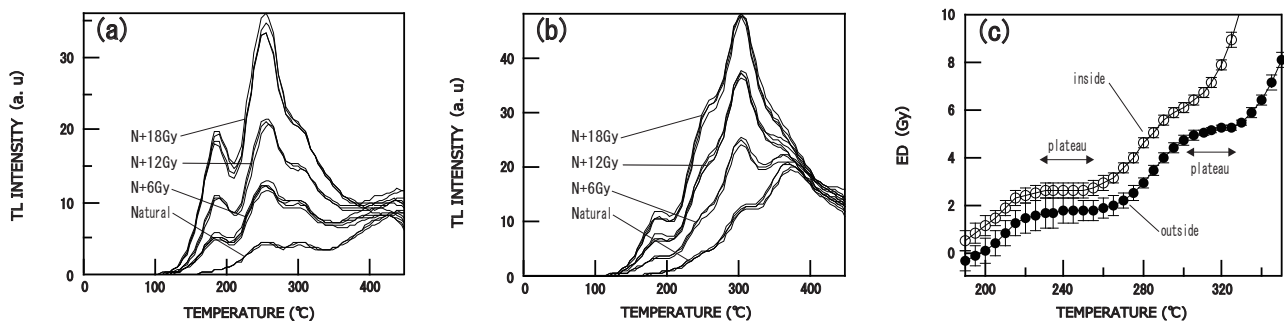


図2 ED プラトー解析による被熱温度推定（長友ほか，2007 を改変）  
 (a) は被熱している岩石の TL グローカーブ。(b) は (a) と同試料の内側から抽出した石英のグローカーブ。350°C以降の TL 強度に差が無いため、被熱しているものの 500°Cには達していない。(c) は同試料の表面側 (outside) と内側 (inside) からそれぞれ抽出した石英粗粒子の ED プラトー解析結果。両試料とも 240°C付近にプラトーが確認できる。また、表面側では 320°C付近にプラトーが現れるが、内側では見られないため、「試料表面は 350°Cを超える温度で加熱を受けたが、内側は 250°C程度までしか温度が上がらなかった」と推定できる。

使って解析するプラトーテストを行う。これに対して、温度ごとに求めた ED を温度に対してプロットし、プラトーになる ED を採用する解析方法が ED プラトー解析である (Zimmerman and Huxtable, 1971)。被熱の有無については、ED プラトーが確認できた温度領域では被熱があったと判断可能である。ED プラトーの温度範囲は、対照試料との比較がより有効である (図2)。

なお十分な被熱が確認された試料の場合は、低線量領域の補正 (スプラリニアリティ補正; SPR) と年間線量の測定を行うことで年代測定も可能である。

### 3.2. TL 感度変化法

TL 感度変化法とは、被熱温度によって、同じ放射線量による TL 測定でも発光強度が変化する、すなわち感度変化を起こすことを利用した方法である。この変化を見るため、試料を段階的に加熱した複数の試料を準備し、それぞれの試料の TL 強度の感度変化の様子を確認する。段階的な加熱に伴う感度変化で被熱温度を推定する方法では、市川ほか (1979) のように SPR 値を被熱温度の指標とする試み、橋本ほか (1994) のように被熱の無い対照試料の段階加熱で得た TL 強度と被熱試料の TL 強度を比較するもの、奥山・長友 (1999) や長友ほか (2003) のように、N の TL 強度が段階加熱試料のどの温度の TL 強度に相当す

るのか調べるもの、西村 (2007) のように段階加熱した試料の TL 感度が変化する温度を捉えるものなどがある。ここでは最も簡便である西村 (2007) による方法を紹介する。

手順は以下の通りである。

- (1) 暗室にて石英粗粒子法の試料処理を行う。
- (2) 処理済み試料を 10 個に取り分ける。
- (3) 手順 (2) のうち 8 個について、それぞれ電気炉を使用して 300~1000°C の範囲を 100°C 刻みで加熱処理する。加熱時間は 60 分などに統一すると良い。この加熱処理によって、現在の蓄積線量がゼロイングされると同時に加熱温度に対応した感度変化が生じる。なお、手順 (2) の分取点数を増やしてさらに細かく加熱温度を刻んでもよい。
- (4) 手順 (3) で加熱処理した試料に手順 (2) の試料から 1 個加え、一定量の付加照射を行う。
- (5) 手順 (4) で照射した試料と手順 (2) の試料の残り 1 個を加え、TL 測定する。

被熱温度は、TL グローカーブのピーク強度を加熱温度に対してプロットした図で判定する (図3)。ピーク強度は試料および検出する波長領域などにもよるが、石英では 200°C 付近と 325°C 付近に大きなグローカーブのピークが見られる場合が多いので、それぞれの強度を取ればよい。この時、ピーク強度は付加照射線量分の TL 強度で比較し



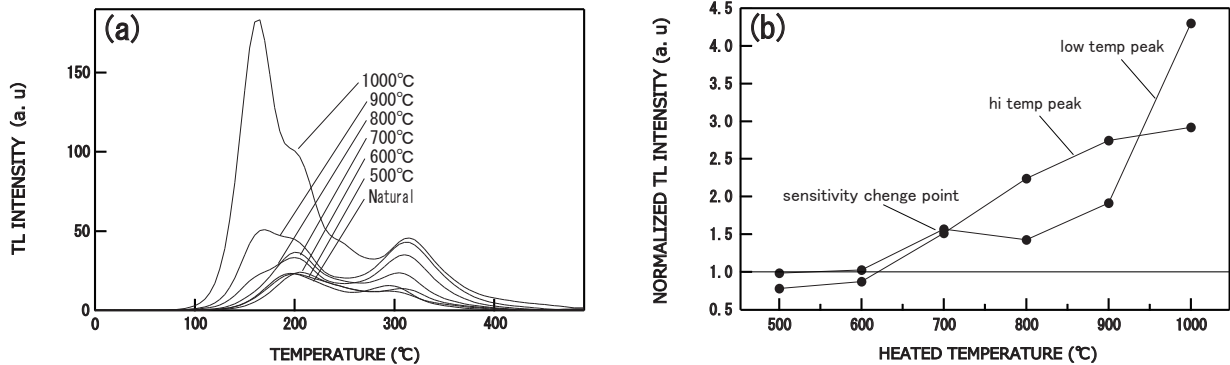


図3 TL 感度変化法による被熱温度推定例 (西村, 2007 を改変)

(a) は縄文土器から抽出した石英粗粒子を 500~1000°C で 1 時間加熱し、照射した後の各 TL グローカーブ。(b) は低温側 (200°C 付近, low temp peak) と高温側 (300°C 付近, hi temp peak) のピークにおける TL 強度の推移。横軸は加熱処理時の温度を示している。加熱処理温度が 600°C までは TL 強度は一定であるが、700°C を超えると TL 強度が増加するようになり、その変化から 600~700°C で被熱していたと考えられる。

なければならない。比較の基準とする温度推定試料の現在の放射線感度を持つ試料 (ベース試料) の TL 強度には、N に付加照射した試料 (手順 (4) に相当) の TL 強度から N の TL 強度を差し引いたものを設定し、手順 (3) の段階加熱試料の TL 強度を規格化する。図 3 の例では、600°C までは規格化した TL 強度が一定であるが、700°C で TL 強度が増加するようになり、大きく変化している。この TL 強度の変化点で感度変化が起こっていると考え、この変化点の温度程度の被熱があったと判定する。

### 3.3. IRSL 感度変化法

IRSL 感度変化法とは、3.2 と類似した方法であり、被熱温度によって IRSL の発光感度が変化することを利用した方法である (西村, 2007; 西村ほか, 2007)。測定には微粒子試料を用いる。IRSL 感度変化法では、石英粗粒子に比べて少量で測定できる微粒子試料を用いることや、露光した試料も使用できるため、測定対象となる試料が多岐にわたることが特徴である。西村 (2007) は石英粗粒子の OSL 測定による感度変化法も行っているが、感度変化が大きく適応できない場合も見られたため、補助的に扱っている。

IRSL 感度変化法の手順は以下の通りである。

- (1) 微粒子法の試料処理を行う。
- (2) IRSL 信号のリセット (光ブリーチ) を行う。これは、基準となる N 試料の状態での放射線感度測定試料 (ベース試料) も光ブリーチを行い、加熱処理をした試料と同一線量での OSL 強度の変化を観察するためである。条件は様々であるが、人工太陽光を用いて 60 klx で 8 時間程度行くとゼロイングが完全である場合が多い。この後、ゼロイングが完全かどうかチェックのための IRSL 測定をすると良い。
- (3) 光ブリーチ後の試料を 9 つに取り分ける。
- (4) ベース試料用の 1 つを残して TL 感度変化法の場合と同じように、電気炉を使用してそれぞれ異なる温度で加熱処理をする。加熱する時間は 60 分などに統一し、加熱温度は 100°C 刻みで 300~1000°C などとする。
- (5) 光ブリーチと段階加熱した試料すべてに放射線を照射

する。線量は任意であるが、おおよそ推定される蓄積線量を目安に行っている。

- (6) IRSL 測定を行う。近年、一度低温で IRSL 測定した後、再度高温で IRSL 測定して安定した信号を検出する post-IR IRSL 測定 (Thomsen *et al.*, 2008) が盛んであるが、この測定では 60°C 程度での測定が良い。プレヒートは 160°C (下岡・長友, 2001) で行う。

被熱温度は、加熱温度ごとの IRSL 強度の比較によって判定する。IRSL 強度の比較には 40~80 秒の IRSL 強度を積算した後、同様に積算したベース試料の IRSL 強度で規格化し、加熱温度に対してプロットした図を作成する (図 4)。ここから TL 感度変化法と同じように変化点を捉えて被熱温度を推定する。

西村 (2007) ではこの方法の考案にあたり、陶芸用粘土から抽出した微粒子試料を用いて、①段階的な加熱温度に伴う IRSL 強度推移 (図 4a, b)、②あらかじめ加熱した試料を再度段階的に加熱した時の推移 (図 4c) を確認している。①からは 600°C 付近まで徐々に IRSL 強度が下がった後上昇に転じ、850°C で最高強度に達した後は再び下降する様子が、②からは、あらかじめ加熱した温度までは IRSL 強度がほぼ安定状態であった後、①と同じ変化をすることが確認された。また、弥生土器の表面と内面それぞれからも被熱温度を求めており、表面の方がより高温の被熱との結果を得た。OSL 感度変化法は、試料選択上の特性から TL 感度変化法では得られないような、より局所的な被熱温度推定が可能な方法といえる。

### 3.4. 方法のまとめ

上記の通り、被熱履歴の推定方法には、少なくとも 3 種類の有力な方法がある。試料に対して、どの方法を採用するのかは、サンプル中の石英や長石の量、露光の有無、どのような情報を引き出したいかを考慮して決定すべきであろう。例えば、試料が過去に熱を受けているかどうかだけを知りたい場合は、試料準備の制約が少なく、手法的にも簡便な TL グローカーブ形状法を試みればよい。

なおこれらの測定は、年代測定を行う場合に近年一般的となっている single aliquot による測定ではなく、multiple

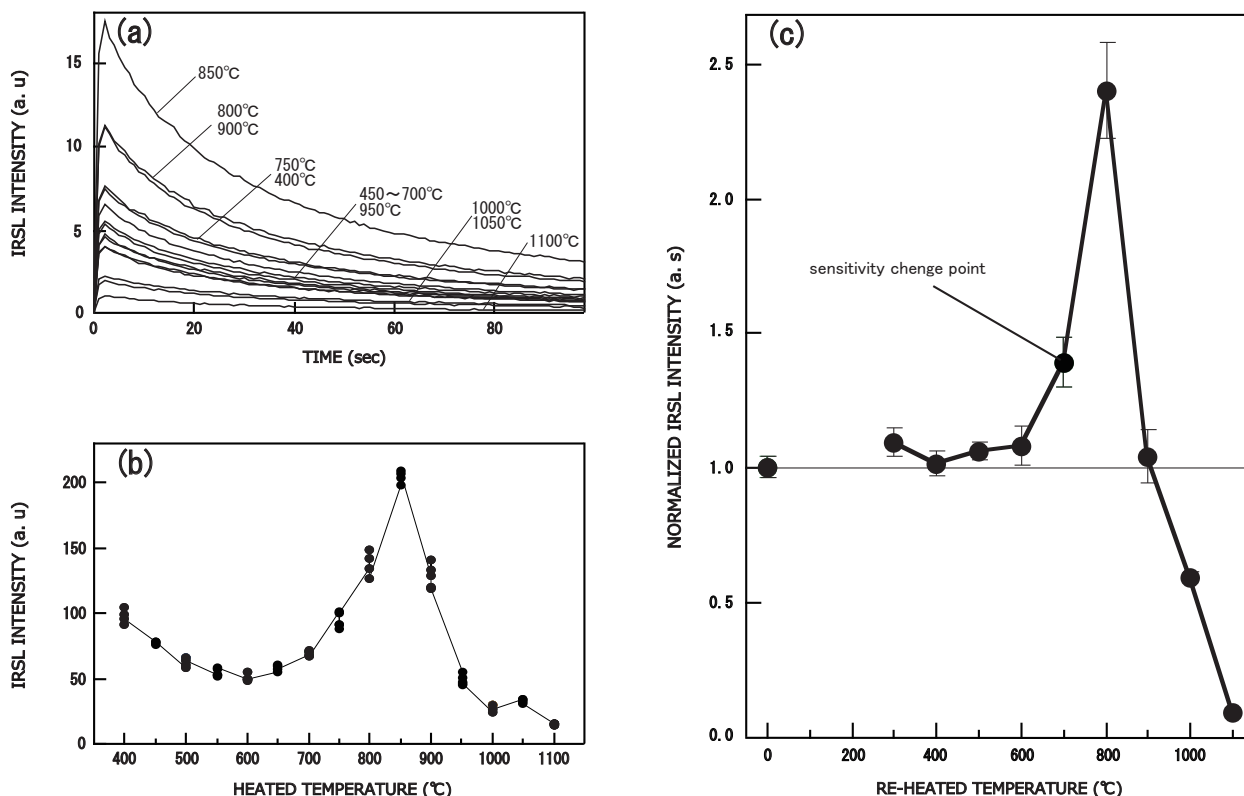


図4 テストピースによるIRSL感度変化法による被熱温度推定例 (西村, 2007を改変)

(a)は400~1100°C (50°C間隔)で加熱した後の各シャインダウンカーブ (IRSL強度を測定時間の関数としてプロットした図). (b)は40~80秒のIRSL強度を積算して作成した強度比較図. (c)は700°Cで加熱した後,再度300~1100°Cで加熱した時のIRSL強度比較図. 始めの加熱温度である700°C付近から強度が大きく変化し,それ以降は加熱の無かった場合と同じ感度変化を示す.

aliquotによる測定であるという点に留意する必要がある. multiple aliquotでは,複数の試料皿に取り分けて測定を行うため,重量および試料の広げ方によるルミネッセンス強度のバラつきを防ぐ目的で,各aliquotについて試料量を統一させる必要が生じる.これはSAR法の開発までは一般的に行われていたことであるが,電子天秤での正確な定量が必要であるほか,aliquotは十分慎重に測定装置に設置することが求められる.

#### 4. 考古遺跡から検出された「焼土」の被熱履歴推定例

上述した手法を用いて,実際に被熱履歴を推定した事例を紹介する.試料は考古遺跡から検出された「焼土」とみられる,周囲と比較してよく締まった赤褐色を呈した土である.採取されたブロック試料に,最大2cm角程度の「焼土」がまばらに入っていた(小畑ほか,2013).この「焼土」が被熱したものなのか,また被熱が確認された場合は被熱温度が何°Cくらいなのかを検討した.本件における被熱の有無は遺構の性質を決める重要な手がかりとなり,被熱温度は当時の技術を復元するための情報を与える.分析は,赤褐色の土のみを採取した後,微粒子法の試料処理ならびに先述した被熱履歴推定手順に従って測定を行った.同時に,赤褐色土が見られない部分から比較対照試料を設定した.さらに,比較対照試料をあらかじめ500°Cで60分

間加熱した後,被熱温度が再現できるかも確認した.

図5に結果を示す.(a)は比較対照試料のIRSL感度変化法による測定結果である. IRSL強度は500°Cまで下がった後上昇しており,強度が一定な温度領域は見られない.(b)は比較対照試料を500°Cで加熱した後,IRSL感度変化法による被熱温度推定で再現できるか確認した結果である.被熱温度まではIRSL強度が大きく変化しないことが確認できた.変化が見られるかどうかの判定には,SAR法を用いた蓄積線量評価で行われるRecycling ratio test (Murray and Wintle, 2000)を参考にした.(c)は「焼土」試料のTLグローカーブである.300°C以上の温度領域で付加照射量に応じてTL強度が大きくなっている.(d)はIRSL感度変化法による測定結果である.先に設定した基準からは若干外れるものの500°Cまでは大きな変化が見られなかった.比較対照試料(b)の結果と同様であり,以上を総合的に判定した結果,よく締まった赤褐色部分は,500°C程度の熱を受けた焼土であると推定された.

#### 5. まとめ

今回はルミネッセンス現象を用いた被熱履歴推定法の概要について紹介した.ルミネッセンス以外にも,放射線損傷によって生じた捕獲電子を利用する方法として,電子スピン共鳴(ESR)による被熱履歴推定方法(藁科,1981;

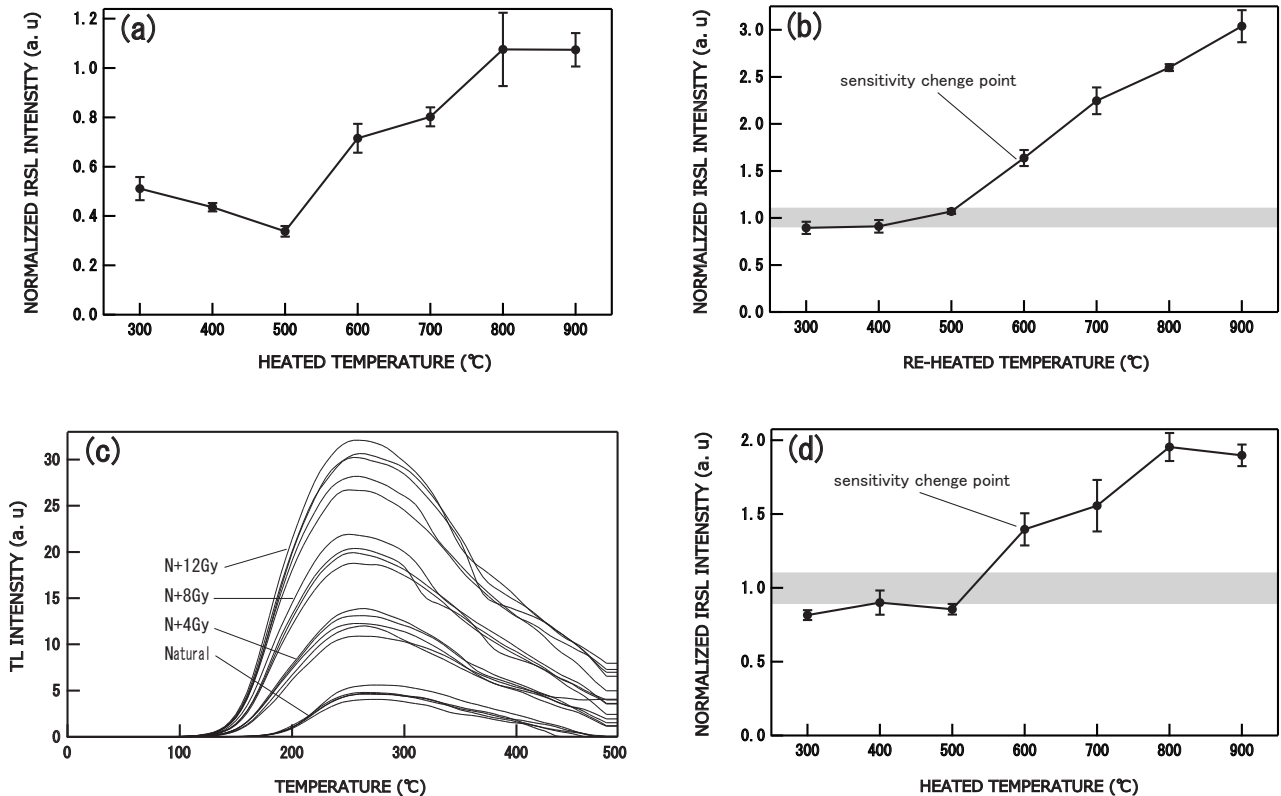


図5 遺跡出土「焼土」による実際の測定例 (小畑ほか, 2013 を改変)

(a) は同一地点の赤褐色土が見られない部分から設定した比較対照試料の IRSL 測定結果. IRSL 強度が 500°C まで下がった後, 増加する. (b) IRSL 感度変化法の再現実験結果. 500°C で加熱した比較対照試料では被熱温度まで IRSL 強度が変化しないことが確認できた. (c) は TL グローブカーブ形状法による測定結果. 300°C 以上の温度領域で付加照射量に応じて TL 強度が大きくなっており, 400~500°C 以上の被熱が想定される. (d) は IRSL 感度変化法による測定結果. 500°C までは大きな変化が見られなかったことから, 500°C 程度の熱を受けた焼土であると推定された.

Toyoda *et al.*, 1993; 長友ほか, 2003 など) も考案されている. 上記の通り, 被熱履歴推定法はこれまで主に考古試料に対して適用されてきた. 今後は TL・OSL・ESR を併用して地質試料への適用も含め, 様々な現象の解明の一助となるようデータの蓄積に努めていきたい.

## 謝辞

奈良教育大学の長友恒人名誉教授と, ナカシャクリエタイプ株式会社の西村誠治氏には被熱温度推定の手法についてご指導, ご教示いただいた. また, 蒜山地質年代学研究所の竹下浩征所長と郷津知太郎博士には本稿を査読していただき, 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, 357p.
- Aitken, M. J. (1998) An introduction to optical dating. Oxford university press, London, 267p.
- Bailiff, I. K. and Holland, N. (2000) Dating bricks of the last two millennia from Newcastle upon Tyne: a preliminary study. *Radiation Measurements*, **32**, 615-619.
- 橋本哲夫・小西正芳・高橋英史・市野正廣 (1994) 石英粒子から

の熱ルミネッセンス観測による窯遺跡の被熱温度推定. 考古学と自然科学, **30**, 11-22.

市川米太 (1968) 熱ルミネッセンスによる土器の年代測定. 考古学と自然科学, **1**, 10-19.

市川米太・萩原直樹 (1978) 熱ルミネッセンス法による焼土・焼石の年代測定. 考古学と自然科学, **11**, 1-7.

市川米太・平岡隆彦・寺井善貴 (1979) 熱ルミネッセンス法による土器の焼成温度の推定. 古文化財教育研究報告, **8**, 19-23.

Higashimura, T., Ichikawa, Y. and Sidei, T. (1963) Dosimetry of atomic bomb radiation in Hiroshima by thermoluminescence of roof tiles. *Science*, **139**, 1284-1285.

Huntley, D. J., Godfrey-Smith, D. I. and Thewalt, M. L. W. (1985) Optical dating of sediments. *Nature*, **313**, 105-107.

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.

長友恒人・西村誠治・柴田昌晃 (2003) TL/ESR 測定による被熱変形した弥生土器の被熱温度推定. 日本文化財科学会第 20 回大会研究発表要旨集, 74-75.

長友恒人・西村誠治・株式会社古環境研究所 (2007) 任海宮田遺跡 B6 地区出土焼石の被熱判定. 任海宮田遺跡発掘調査報告 II - 公害防除特別土地改良事業に伴う埋蔵文化財発掘調査報告

- Ⅶ - (第四分冊) 富山県文化振興財団埋蔵文化財発掘調査報告第34集, 財団法人富山県文化振興財団, 1-6.
- 長友恒人・小畑直也・下岡順直 (2010) 竹佐中原遺跡における地層の光ルミネッセンス年代測定について. 長野県竹佐中原遺跡における旧石器時代の石器文化Ⅱ, 国道474号(飯橋道路)埋蔵文化財発掘調査報告書2-飯田市内その2-, 長野県埋蔵文化財センター発掘調査報告書85, 国土交通省中部地方整備局・長野県埋蔵文化財センター, 1-6.
- 西村誠治 (2007) 実験考古学と科学-被熱温度推定を中心として-. 2006年度奈良教育大学大学院修士論文.
- 西村誠治・長友恒人・鐘ヶ江賢二・長友朋子 (2007) IRSL法による弥生土器の被熱温度推定. 日本文化財科学会第24回大会研究発表要旨集, 36-37.
- 小畑直也・長友恒人・青木智史 (2013) 焼土の被熱温度推定. 日本文化財科学会第30回大会研究発表要旨集, 164-165.
- 奥山誠義・長友恒人 (1998) OSL・TL・ESR法による焼石・焼土の被熱温度の推定. 日本文化財科学会第15回大会研究発表要旨集, 210-211.
- 奥山誠義・長友恒人 (1999) OSL・TL・ESR法による焼石・焼土の被熱温度の推定(2)~TL法・OSL法による被熱温度推定の基礎的研究~. 日本文化財科学会第16回大会研究発表要旨集, 198-199.
- 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-日本における年代測定研究の現状-. 地質技術, no. 1, 5-17.
- 下岡順直 (2013) 考古学における TL および OSL 年代測定の適用例. 月刊地球, 号外 no. 62, 66-72.
- 下岡順直・長友恒人 (2001) 石英・長石を試料とした光励起ルミネッセンス年代測定法の基礎研究. *RADIOISOTOPES*, **50**, 381-389.
- Shitaoka, Y., Maemoku, H. and Nagatomo, T. (2012) Quartz OSL dating of sand dunes in Ghaggar basin, northwestern India. *Geochronometria*, **39**, 221-226.
- 下岡順直・竹村恵二・長友恒人 (2013) 日本列島における第四紀後期指標テフラの熱ルミネッセンス年代測定. 第四紀研究, **52**, 139-150.
- Thomsen, K. J., Murray, A. S., Jain, M. and Botter-Jensen, L. (2008) Laboratory fading rates of various luminescence signals from feldspar-rich sediment extracts. *Radiation Measurements*, **43**, 1474-1486.
- Toyoda, S., Ikeya, M., Dunnell, R. C. and McCutcheon, P. T. (1993) The use of electron spin resonance (ESR) for the determination of prehistoric lithic heat treatment. *Applied Radiation and Isotopes*, **44**, 227-231.
- 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.
- 藁科哲男 (1981) ESRによる土器の焼成温度の推定. 月刊地球, **3**, 517-523.
- Zimmerman, D. W. and Huxtable, J. (1971) Thermoluminescent dating of upper Palaeolithic fired clay from DOLNÍ VĚSTONICE. *Archaeometry*, **13**, 53-57.

