

## 残存TLを評価したTL年代測定法の改良と それを利用したレス堆積物のTL年代とOSL年代の比較

下岡 順直\*・長友 恒人・小畑 直也\*\*

奈良教育大学理科教育講座 (古文化財科学)

(平成20年5月7日受理)

## An Improvement of Total-bleach Thermoluminescence Dating Method and the Comparison of Its Results with Optically Stimulated Luminescence Dating

Yorinao SHITAOKA\*, Tsuneto NAGATOMO and Naoya OBATA\*\*

(Department of Archeological Science, Nara University of Education, Nara 630-8528, Japan)

(Received May 7, 2008)

### Abstract

Thermoluminescence (TL) dating by the total-bleach method has been used for the age determination of sediments. It is difficult to get the reliable ages by this method, because there is no routine method to check accurately the level of the residual TL.

In this study, the amounts of residual TL of quartz fine grain (ca.1-8 $\mu$ m) samples were compared with those of residual OSL of the same samples by bleaching them with a 60-klx light source. As a result, we found that elapsed time of light exposure, which guarantees the residual OSL intensity nearly zero, can be a criterion to estimate the level of the residual TL. TL age of a Chinese loess deposit was estimated by the improved total-bleach method using the estimated residual TL comparing with the residual OSL. The TL age obtained was in good agreement with OSL age of the same loess sample.

**Key Words :** Dating, Residual TL,  
Total-bleach method,  
Optical bleaching,  
Chinese loess deposit

**キーワード :** 年代測定, 残存TL,  
トータルブリーチ法,  
光ブリーチ,  
中国レス堆積物

## 1. はじめに

熱ルミネッセンス (Thermoluminescence, TL) は, Daniels らによる鉍物に対する観察<sup>(1)</sup>やKennedyらによるギリシャ土器片の測定<sup>(2)</sup>により, その年代測定法としての有効性が指摘された. 今日では, 土器の焼成年代や火山灰の噴出年代などを推定するための方法として地球科学や考古学などの多くの分野で適用されている<sup>(3)(4)(5)(6)</sup>.

TL年代測定法は, 加熱によってタイムゼロイングされた試料に対して有効な方法であるが, 加熱された履歴がないレスなどの風成塵起源の堆積物や水成堆積物に対してもTL法を用いた年代測定の試みが行われてきた. 1968年にソヴィエトのMorozovは, ウクライナの現生のレス堆積物に対してTL測定を行い, TL信号がほとんどない, あるいは検出できなかったとしている<sup>(7)</sup>. Wintleらは深海堆積物に対してTL年代測定を試み, 紫外線照射によるTL信号の減衰を観察した<sup>(8)</sup>. 1982年には, Singhviらによってインドの砂丘試料についてTL年代測定が試みられている<sup>(9)</sup>. これら堆積物のTL年代測定では, 露光によってTL信号がどの程度減少するか, またTL信号のゼロイングの不完全さを評価できるかが年代評価の可否を決定づける. Wintleは, 堆積物とくにレス堆積物のTL年代測定について, TL信号のゼロイングや蓄積線量評価法, 特に測定方法や露光によるTL信号の感度変化, プラトートテストの問題点などについてレビューをした<sup>(10)</sup>. TL法による堆積物の蓄積線量評価法では, 露光されても残存するTL信号 (残存TL) を評価して蓄積線量を求めるTotal bleach法 (図1-1) と, 露光しない試料と短時間露光をした試料を測定して, それらの試料の感度変化より蓄積線量を求めるPartial bleach法 (図1-2) の2つの方法が考案された<sup>(10)(11)(12)</sup>. しかし, これらの方法によって露光によるゼロイングの不完全さ (残存TL) が評価されたとしても, 実際のタイムゼロイングをどこまで正確に再現できているかを保証するものではなかった.

一方, 光に対して反応速度が早いルミネッセンス信号のみを用いる方法として, 光ルミネッセンス (Optically stimulated luminescence, OSL) 年代測定法が, 1985年にHuntlyらによって示された<sup>(13)</sup>. OSL法は, 太陽光など露光によってタイムゼロイングされた試料に対して有効な方法として, レスなどの風成塵起源の堆積物や水成堆積物などの年代推定に用いられるようになった. 1988年にGodfrey-Smithらは, 露光による石英と長石のTL信号強度とOSL信号強度の時間経過による減衰について実験を行い, TL信号では約20時間経過して最初の1%程度までTL信号強度が減衰するのに対して, OSL信号では石英で約20秒, 長石でも約7分程度で最初の1%以下にまでOSL信号強度が減衰することを示した<sup>(14)</sup>.

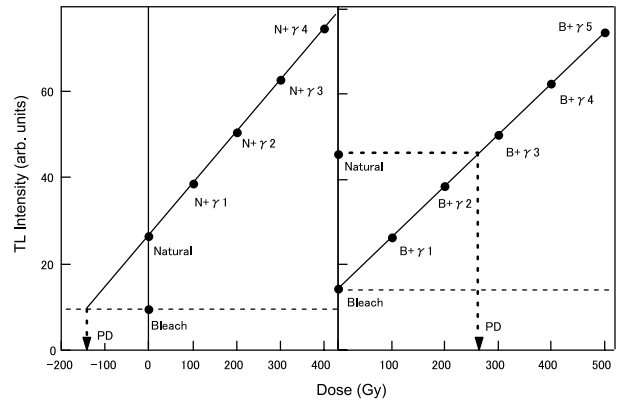


図1-1 Total bleach法—残存TLを考慮したTL法による蓄積線量 (PD) 評価方法 (左: 付加線量法, 右: 再現法).

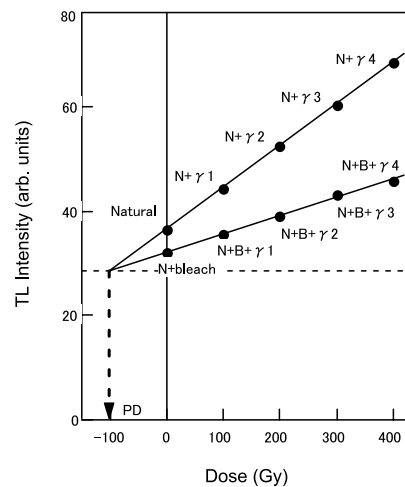


図1-2 Partial bleach法—露光による試料の感度変化を用いたTL法による蓄積線量 (PD) 評価方法.

同年に, Hüttらによって長石の赤外光励起によるOSL (Infra-red stimulated luminescence, IRSL) 年代測定の有効性が示され<sup>(15)</sup>, また2000年にはMurrayらによってSingle aliquot regenerative-dose (SAR) 法が開発され, 堆積時の露光の不均一さや測定時の感度変化の補正などが行えるようになる<sup>(16)</sup>など, 今日では堆積物のOSL年代測定が高精度で適用できるようになった<sup>(17)</sup>. 近年では, 電子スピン共鳴 (ESR) 法による年代測定においても堆積物への応用が試みられ, AlセンターよりもTi-Liセンターの方が光に対して感受性があることが明らかにされ, 露光約520時間でほぼタイムゼロイングされることなどがわかってきている<sup>(18)</sup>. しかし, ESRの場合も実際の露光においてこのような長時間露光がなされているかの検証は非常に難しいと考えられる.

上述のようにOSL法では, 露光テストにより信号のリセットが完全になされていることの確認を簡便に行えるようになった. これに着目して, 我々は露光されても残存するTL信号 (残存TL) の評価に有効な手段として, OSL法を併用して露光実験を行い, TL信号とOSL信号

の減衰の程度を比較することで残存TL評価の精度を向上させることができるのではないかと考えた。そこで、中国レスから抽出した粒径約1~8 $\mu$ m程度の石英（以下、石英微粒子）を用いてTL信号とOSL信号の露光（光ブリーチ）による基礎実験を行い、露光時間に対するTL信号とOSL信号の減衰を比較した。また、同一の中国レスから抽出した石英微粒子を用いて測定したTL年代とOSL年代を比較し、OSLによる残存TL評価の手順を追加した堆積物のTL年代測定の有効性について検討を行った。

## 2. 測定

### 2. 1. 試料処理

試料は、中国河北省泥河湾盆地に位置する油房旧石器遺跡<sup>(19)</sup>から採取したレス（馬蘭黄土）を用いた。試料処理は、約1lx程度の暗赤色灯下で行った。まず、水をはったバケツの中に採取したレス試料を入れ、塊を砕き粒子をバラバラにするとともに植物の根などを除去した。攪拌後3~5分間放置して沈殿物と浮遊物に分離した。今回の測定では、約1~8 $\mu$ m程度の粒子を使用するため、このあとは浮遊物を以下のように試料処理した。まず、浮遊物を1週間程度バケツ内で放置して沈殿させた沈殿物をピーカーに分取し、10%過酸化水素水を用いて1晩処理を行い、有機物を完全に除去した。次にアセトン中での粒子の沈降速度差を利用して、試料の粒度を約1~8 $\mu$ m程度に揃えた。最後に、炭酸塩鉱物を除去するために塩酸20%溶液を用いて120分間処理を行った。その後に水道水と蒸留水を用いて洗浄した後、50℃の恒温槽で試料を乾燥させた。さらに石英鉱物だけに純化させるために、ケイフッ化水素酸20%溶液を用いて3日間処理を3回繰り返し<sup>(20)</sup>、その後洗浄して乾燥させた。

なお、試料の一部を用いてX線回折とIRSL測定を行い、石英以外の鉱物がほぼ除去できていることを確認した。IRSL測定では主に長石による発光が観察され、石英鉱物はIRSL測定では発光しないとされている<sup>(21)</sup>。よって、ケイフッ化水素酸処理後にIRSL測定を行ってIRSL発光がしないことを確認することは、長石が除去できているかを確認するための有効な手段の一つである。

### 2. 2. 露光実験

抽出した石英微粒子試料に<sup>60</sup>Co $\gamma$ 線を30Gy照射後、人工太陽システムを用いて露光実験を行った。人工太陽システムは、セリック社製人工太陽システムを用いた。一般的な人工太陽システムでは、紫外線領域の強度が太陽光よりも強い場合が多いが、このシステムの発光波長パターンは、ほぼ太陽光と近似したものである（図2）。通常露光実験を太陽光下で行う場合、日中の太陽の移動

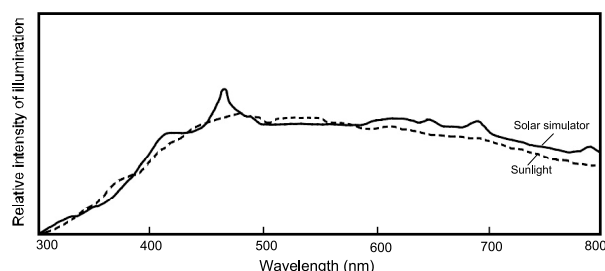


図2 セリック社製人工太陽システムの発光スペクトルと太陽光の発光スペクトルの比較。

とともに照度が増えるため、照度計を用いて照度を記録する必要がある。しかし、人工太陽システムを用いた場合はこのような考慮を必要としないことも利点である。

照射した石英微粒子試料は、試料の位置における照度が約60k lxになるように設定した人工太陽の下で、0秒（露光なし）、1秒、10秒、60秒、600秒、10800秒（3時間）、28800秒（8時間）間露光を行った。その後、試料を二分して片方をTL測定、もう片方をOSL測定に用いた。TL測定は、Daybreak社製のモデル1150を用い、昇温速度10℃/秒、最高温度450℃まで室温から連続昇温法で測定を行った。検出波長は、Corning社製の7-59フィルターとSchott社製のBG39フィルターを重ねて、310~440nm（FWHM）に設定した。OSL測定は、NRL-99-OSTL自動測定装置<sup>(22)</sup>を用いた。励起光波長は、青色LED（470 $\pm$ 40 nm）を用い、励起光強度を18.1mW/cm<sup>2</sup>とした（以下、青色光励起のOSLをBlue-light stimulated luminescence, BLSLと称す）。検出波長は、S-UVフィルターを用いて250~380nm（FWHM）に設定した。BLSL測定前の加熱処理（プレヒート処理）は220℃で60秒間行い、測定温度120℃で100秒間BLSL測定を行った<sup>(21)</sup>。

### 2. 3. 蓄積線量およびルミネッセンス年代の評価

レスの石英微粒子試料は、Multiple aliquot（多試料）を用いて露光実験の結果を基に残存TLを評価するTotal bleach法によるTL測定とBLSL測定を行った。試料のTL測定とBLSL測定の測定条件は、露光実験の場合における測定条件と同じである。多試料による蓄積線量評価のためのデータ解析には、付加線量（Additive dose）法を用いた。この場合、低線量域における補正（スプラリニアリティー補正）のために、抽出した試料（以下、ナチュラル試料）の信号を人為的にゼロにしなければならない。そのための処理として、OSL用試料は人工太陽システムを用いて約60k lx程度で露光した。TL測定用試料は残存TLを評価するために同様に露光処理を行った。その後、<sup>60</sup>Coの $\gamma$ 線源を用いて、約0.2Gy/分の線量率で人工照射を行った。

年間線量の評価は、 $\gamma$ 線スペクトロメトリーによる間

接測定法により行った。採取した試料を乾燥させ、無酸素銅と低バックグラウンド鉛で遮蔽した容器内で高純度Ge検出器を用いて試料からの $\gamma$ 線を計測した。それを産業技術総合研究所（旧地質調査所）が提供するJA-3, JB-2, JB-3, JG-1a, JR-1の5標準試料を用いて検量し、試料中のU, Th,  $^{40}\text{K}$ の濃度を計算した。これらの濃度から放射線量率への換算式<sup>(11)</sup>にあてはめて、年間線量を計算した。さらに、土壌中の含水率を含有水分量と乾燥した土壌重量の比として、上記の年間 $\alpha$ 線量, 年間 $\beta$ 線量, 年間 $\gamma$ 線量に対して、含水率補正を行った。このとき、 $\alpha$ 線のルミネッセンス効率は10%, 年間宇宙線量を0.15Gy/kaと仮定した。

### 3. 結果と考察

#### 3. 1. 露光実験

レスから抽出した石英微粒子試料の露光なしと28800秒（8時間）間露光後のTL測定とBLSL測定の結果を図3に示す。TL測定では、8時間の露光で200℃～300℃付近までのTLグローカーブがほぼ減衰していることがわかる。約340℃付近のTLピークも減衰し、8時間露光経過後では見かけ上約340℃付近のTLピークが見えなくなっている。一方、露光なしのBLSLは最初の10秒間で強度が急激に減衰しているのに対して、8時間露光後のBLSLは強度が小さく、ほとんど減衰していないことがわかる。

次に、TLでは約340℃のTL信号を、BLSLでは測定開始1秒間のBLSL信号を用いて、ルミネッセンス信号の露光による減衰の時間経過を観察した。図4は、露光なしのTL信号強度とBLSL信号強度を基準にして表示した。TLでは、1分経過後までほとんどTL強度が減衰しなかった。その後、3時間経過後にTL強度は約24%、8時間経過後で約17%まで減衰することがわかった。これに対して、BLSLでは、BLSL強度は10秒経過後で約8%程度まで急激に減少している。10分経過後でBLSL強度は約4%程度まで減少し、8時間経過後までそれ以上減衰は示さなかった。下岡・長友によると、BLSLについては石英の鉱物標本試料を用いて、7月の太陽光下でさらに長時間（16時間まで）露光実験を行ったが、4時間で3～5%程度まで減衰した以降は16時間までの間変化がなかった<sup>(21)</sup>。これらの結果から、石英のBLSLでは、10分以上露光されていれば、BLSL信号はほぼ減衰して変化が少なくなることから、ほぼ試料はタイムゼロイングされていると考えることができるだろう<sup>(23)</sup>。しかし、TL信号は3時間経過後よりも8時間経過後のほうがさらに減衰している。この結果から、TL信号の場合、8時間以上露光を行うと、さらに信号の減衰が起こる可能性がある。これは、Morozovの現生レスのTL信号がほぼゼ

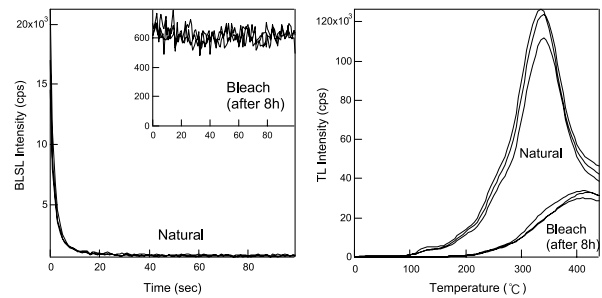


図3 レス試料から抽出した石英微粒子の露光実験。露光なし（Natural）と8時間露光後のスペクトルの比較。左：青色光励起の光ルミネッセンス（BLSL）減衰曲線，右：TLグローカーブ。

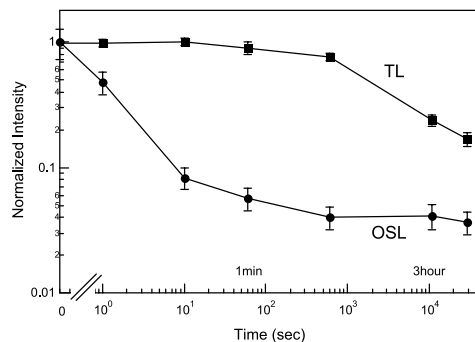


図4 石英微粒子のTL信号とOSL（BLSL）信号の露光による減衰の時間経過（8時間後まで）。露光時間は、0秒（露光なし）、1秒、10秒、60秒、600秒、10800秒（3時間）、28800秒（8時間）間である。ルミネッセンス強度は、露光なしの信号強度で規格化した。

ロであったという報告<sup>(7)</sup>やTatumiらによるブラジルの砂漠地帯の試料でTL測定が有効であった<sup>(24)</sup>ことなどを考慮すると、砂漠地帯などで直射日光によって強い照度で長時間かけて露光される場合には、残存TLはほとんど無視できる程度まで減少するのであろう。しかし、通常の堆積物では、やはり残存TLは無視できないと見なす方が妥当であろう。そこで、残存TLを評価するために、露光の照度と時間について目安となる条件設定をすることが好都合である。BLSL信号が照度60k lxの露光後8時間でほとんどゼロイングされるので、8時間程度の露光をひとつの目安として、残存TLを評価することができるであろう。このように、露光によるTL信号減衰の時間経過を見るために、OSL測定を併用することで、ゼロイングの有無を観察することができるといえるだろう。ただし、BLSL信号は露光後3時間でもほぼゼロイングされていることから、露光時間の設定には議論の余地を残す。8時間の露光によって残存TLを評価することの妥当性については、堆積物の堆積状況やその環境（古地形や古気候）などを把握して総合的に判断する必要があるだろう。

3. 2. 蓄積線量およびルミネッセンス年代の評価

露光実験の結果を用いて、人工太陽の下でナチュラル試料を約8時間露光した。その後、TL測定用試料とOSL測定用試料は、露光を終了してから1時間程度放置した後にBLSL測定を行い、BLSL信号がほぼゼロになっていることを確認した。確認後、TL測定では、残存TLを測定した。BLSL法では、付加線量を照射して測定を行った。TL測定において、付加線量を照射した試料と露光した試料の残存TLを測定した結果を図5に示す。TL測定では、TL信号が減衰せずに安定しているかを確認するプラトーテスト (図6) を行い、TL信号が安定している温度範囲のTL強度を積算して生長曲線を作成した。今回の試料では、295℃~310℃の温度領域を積算した。残存TLも、295℃~310℃の温度領域を積算してTL強度とした。蓄積線量は、最小二乗法により指数関数に回帰し、外挿して残存TLレベルとの交点から求めた (図5右図)。BLSL測定結果と生長曲線を図7に示す。付加線量法では、最小二乗法により直線回帰し、外挿して横軸との交点が等価線量もしくは低線量域の補正になる。このときの蓄積線量は、等価線量と補正值の和である。これらの解析により、今回試料に用いたレスから抽出した石英微粒子試料の蓄積線量は、Total bleach法によるTL法で $95.8 \pm 9.8$ Gy、BLSL法で $85.5 \pm 15.8$ Gyと誤差の範囲で一致した (表1)。今回、蓄積線量評価は微粒子試料

表1 レス試料から抽出した石英微粒子試料のOSL (BLSL) 年代測定と残存TLを考慮したTL年代測定によるルミネッセンス年代の比較。

	蓄積線量 (Gy)		年間線量 (Gy/ka)	ルミネッセンス年代 (ka)
	等価線量 (Gy)	低線量域補正 (Gy)		
BLSL法	$85.5 \pm 15.8$		$5.49 \pm 0.45$	$16 \pm 3$
	$121.3 \pm 13.4$	$-35.8 \pm 8.4$		
TL法 (Total bleach)	$95.8 \pm 9.8$			$17 \pm 2$

表2 レス試料から抽出した石英微粒子試料の年間線量評価。

年間 $\alpha$ 線量 (Gy/ka)	年間 $\beta$ 線量 (Gy/ka)	年間 $\gamma$ 線量 (Gy/ka)	年間宇宙線量 (Gy/ka)	年間線量 (Gy/ka)
$1.50 \pm 0.08$	$2.47 \pm 0.42$	$1.37 \pm 0.13$	$0.15 \pm 0.01$	$5.49 \pm 0.45$

で行ったので、年間線量は年間 $\alpha$ 線量、年間 $\beta$ 線量、年間 $\gamma$ 線量と年間宇宙線量の総和である。このレス試料の年間線量は、表2に示すように $5.49 \pm 0.45$ Gy/kaと求められた。ルミネッセンス年代は、蓄積線量を年間線量で除することで算出される。これらの結果より、レスのルミネッセンス年代は、残存TLを考慮したTL年代で $17 \pm 2$ ka、BLSL年代で $16 \pm 3$ ka (表2) となり、よい一致をみた。

Total bleach法によるTL測定では、残存TLを評価するために試料を露光した後にBLSL測定を行うという作業を、従来行われてきた手順に追加した。これにより、試料のBLSL信号がゼロになった時点での残存TLを評価

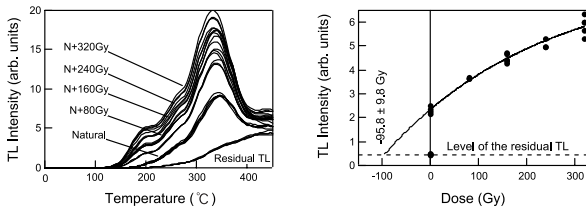


図5 残存TLを考慮したTL測定による蓄積線量評価。左：TLグローカーブ、右：生長曲線。最小二乗法で指数回帰を行い、残存TLレベルとの交点から蓄積線量 ( $95.8 \pm 9.8$ Gy) を求めた。

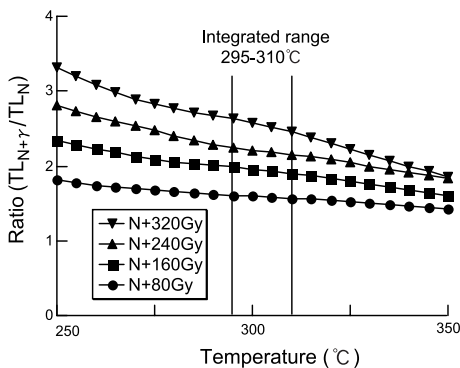


図6 TL測定によるプラトーテスト。信号がほぼ安定している295℃~310℃の温度範囲のTL強度を積算した。

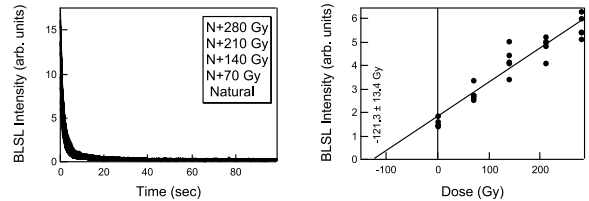


図7-1 BLSL測定による石英微粒子の等価線量評価。左：BLSL減衰曲線、右：生長曲線。BLSL測定では、8~14秒間のルミネッセンス強度を積算して生長曲線を作成した。生長曲線は、最小二乗法で直線回帰を行い、直線を外挿して等価線量 ( $121.3 \pm 13.4$ Gy) を求めた。

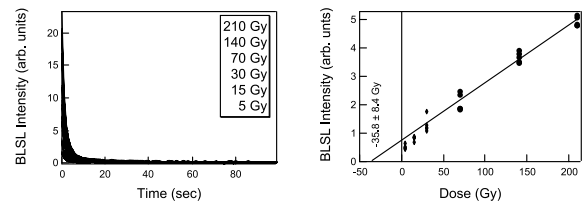


図7-2 BLSL測定による石英微粒子の低線量域補正評価。左：BLSL減衰曲線、右：生長曲線。70Gy~210Gyの範囲を最小二乗法で直線回帰し、補正值 ( $-35.8 \pm 8.4$ Gy) を求めた。

することが有効であることがわかった。また、中国レス試料のTotal bleach法によるTL年代とOSL年代による整合性がみられたことから、今後堆積物のルミネッセンス年代測定を行う上でこの2種類の方法を併用して年代値のクロスチェックを行うことが可能になるだろう。ただし、Total bleach法によるTL年代測定では、5万年よりも古い試料に対しては、他手法で求めた数値年代との整合性が得られなかったという報告<sup>(12)</sup>もあり、様々な堆積物のTotal bleach法によるTL年代測定を適用していくためには、その有効性について今後も個別の項目について詳細に検討していく必要があるだろう。

## 謝 辞

本実験を行うにあたり、中国科学院古脊椎動物与古人類学研究所の衛奇先生と東北学院大学佐川正敏先生にはレス試料を提供していただいた。東北学院大学大学院生の大場正善氏には、現地においていろいろとご協力とご助言をいただいた。以上の皆様に、心から深謝申し上げます。

なお、本報告には、科学研究費補助金（特別研究員奨励費）「ルミネッセンス法と電子スピン共鳴法を用いた年代測定による旧石器遺跡形成史の解明」（平成18年度：課題番号18・2078）の一部を使用した。

## 参考文献

- (1) Daniels, F., Boyd, C.A. and Saunders, D.F. (1953) Thermoluminescence as a Research tool, *Science*, pp.343-349.
- (2) Kennedy, G.C. and Knopff, L. (1960) Dating by thermoluminescence, *Archaeology*, 13, pp.147-148.
- (3) Ichikawa, Y. (1967) Dating of ancient ceramics by Thermoluminescence II, *Bulletin of the institute for chemical research, Kyoto University*, 45-1, pp.63-68.
- (4) 市川米太 (1977) 帝釈峡遺跡出土土器の熱ルミネッセンス年代測定, *考古学と自然科学*, 10, pp.1-9.
- (5) Ichikawa, Y., Hagihara, N. and Nagatomo, T. (1982) Dating of pyroclastic flow deposits by means of the quartz inclusion method, *PACT*, 6, pp.409-416.
- (6) 長友恒人, 下岡順直, 西村誠治 (2004) 同一テフラのTL年代とOSL年代, *奈良教育大学紀要*, 第54巻, 第2号, pp.1-9.
- (7) Wintle, A.G. and Huntly, D.J. (1982) Thermoluminescence dating of sediments, *Quaternary Science Reviews*, 11, pp.31-53.
- (8) Wintle, A.G. and Huntly, D.J. (1979) Thermoluminescence dating of sediments, *PACT* 3, pp.374-380.
- (9) Singhvi, A.K., Sharma, Y.P. and Agrawal, D.P. (1982) Thermoluminescence dating of sand dunes in Rajasthan, India, *Nature*, 295, pp.313-315.
- (10) Wintle, A.G. (1990) Review of current research on TL dating of loess, *Quaternary Science Reviews*, 9, pp.385-397.
- (11) Aitken, M.J. (1985) *Thermoluminescence Dating*, Academic Press.
- (12) 高田将志 (1995) 堆積物のOSL年代測定法—人類紀の新しい年代測定法の現状と課題—, *奈良女子大学文学部研究年報*, 第39号, pp.53-68.
- (13) Huntly, D.J., Godfrey-Smith, D.I. and Thewalt, M.L.W. (1985) Optical dating of sediments, *Nature*, 313, pp.105-107.
- (14) 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, pp.373-380.
- (15) Hütt, G., Jaek, I. and Tchonka, J. (1988) Optical dating: K-feldspars optical response stimulation spectra, *Quaternary Science Reviews*, 7, pp.381-385.
- (16) Murray A.S. and Wintle A.G. (2000) Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol, *Radiation Measurements*, 32, pp.57-73.
- (17) 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—適応年代の拡大と石英のOSL成分について—, *地質学雑誌*, 111, pp.643-653.
- (18) Tissoux, H., Falguères, C., Voinchet, P., Toyoda, S., Bahain, J.J. and Despriée, J. (2007) Potential use of Ti-center in ESR dating of fluvial sediment, *Quaternary Geochronology* 2, pp.367-372.
- (19) 佐川正敏, 大場正善 (2005) 中国旧石器時代研究の動向—学会動向, 生活面の認識, 植刃器を中心に—, 第19回東北日本の旧石器文化を語る会予稿集, pp.82-86.
- (20) Julie Rees-Jones (1995) Optical dating of young sediments using fine-grain quartz, *Ancient TL*, 13-2, pp.9-14.
- (21) 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*, 50-9, pp.381-389.
- (22) 長友恒人, 下岡順直, 國木田大 (2007) ロシア沿海州新石器遺跡堆積物の赤外光ルミネッセンス (IRSL) 年代測定, *奈良教育大学紀要*, 第56巻, 第2号, pp.1-6.
- (23) 小林育夫, 鈴木朗史, 関口寛, 森嶋彌重 (2002) OSL線量計の光アニール法の検討, *日本放射線安全管理学会誌*, 第1巻, 第2号, pp.84-88.
- (24) Tatumi, S.H., Nagatomo, T., Sengupta, D., Watanabe, S., Barreto, A.M.F. and Suguio, K. (1998) Thermoluminescence dating of eolian sediments from sao Francisco river, state of Bahia, Brazil, *Radiation effects & Defects in solida*, 146, pp.285-295.