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

白井 正明^{*1,a}・塚本 すみ子^{*2}・近藤 玲介^{*3}

OSL (光ルミネッセンス) は近年 OSL 年代測定法として、第四紀碎屑物の堆積年代測定に広く用いられている。本研究では、鉱物が十分露光することにより OSL 信号がリセットされることを利用し、現世河川における砂質堆積物の運搬—堆積過程と長石粒子の露光状況の関連を検討した。近畿地方北部の二つの水系において、砂州表層堆積物と 2004 年に形成された洪水堆積物よりアルカリ長石粒子を抽出し、OSL 強度に基づき各サンプルに最近露光した粒子が含まれる割合 (露光率) を算出した。その結果、通常時には河川内の砂粒子は短距離の運搬—堆積を繰り返すこと、そして砂州の水上部への露出が多い河川上流および支流部では、砂粒子が下流域より効率的に露光することなどが推定された。これらの結果は、河川堆積物中のどのような堆積相 (堆積環境) が OSL 年代測定に適するかを示唆するとともに、OSL 測定技術を砂質堆積物の運搬—堆積過程の解析に活用できることを示している。

キーワード：現世河川堆積物、長石粒子、OSL 強度、露光率、運搬—堆積作用

I. はじめに

OSL 年代測定法とは、石英などの白色鉱物で認められている光ルミネッセンス (Optically Stimulated Luminescence : OSL) を利用して、堆積物中に豊富な石英・長石などが露光して以降経過した年代 (露光年代) を過去約十万年間にわたって測定する手法である (例えば, Huntley *et al.*, 1985; Aitken, 1998; 塚本・岩田, 2005; Lian and Roberts, 2006)。石英などの鉱物結晶内の電子は、放射線等のエネルギーにより本来の軌道より遊離し、不対電子を形成することがある。これら不対電子は、熱や光エネルギーによってトラップから解放され元の軌道へ戻るが、その際に発光することによりエネルギーの余剰分を消費する。加熱により生じる発光が熱ルミネッセンス (TL)、光により生じる発光が OSL である (例えば, 高田, 1995)。鉱物が吸収した放射線量 (線量) が大きければ不対電子数が増加していくので、発光強度

も増大する。すなわち、鉱物結晶は放射線照射によりエネルギーを蓄積し、加熱や露光により蓄積したエネルギーを消費する。鉱物が十分に露光すると、蓄えたエネルギーは発光により消費され、OSL 信号は発生しなくなる。この現象がブリーチ (bleach) である。OSL 年代測定法は、OSL 強度を基に鉱物がブリーチ以降に吸収した自然放射線量を推定し、それを基に年代を推定する手法といえる。仮に、粒子のブリーチが不完全であると、OSL 信号は過去の埋積時の放射線被曝の影響をも記録していることになり、OSL 年代は堆積年代より古く見積もられる。そのため、ブリーチの評価は OSL 年代研究の重要な論点の一つである (例えば, Olley *et al.*, 1999; Colls *et al.*, 2001; Bailey *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003; Singarayer *et al.*, 2005)。

河川は、陸域から海域へと堆積粒子を運搬するための主要な系であり、また従来から OSL 年代測定の主要な研究対象の一つである (例えば, Murray *et al.*, 1995 ;

2007 年 10 月 15 日受付。2008 年 7 月 5 日受理。

*1 東京大学海洋研究所 〒164-8639 東京都中野区南台 1-15-1。

*2 Leibniz Institute for Applied Geosciences, Stilleweg 2, 30655 Hannover, Germany.

*3 日本大学文理学部 〒156-855 東京都世田谷区桜上水 3-25-40。

*a Corresponding author : shirai@ori.u-tokyo.ac.jp

Olley *et al.*, 1998; Stokes *et al.*, 2001; Leigh *et al.*, 2004). 河川堆積物には、未露光の鉱物粒子や不完全に露光をした鉱物粒子が大量に含まれていることはよく知られている。そのため、河川堆積物の OSL 年代報告はより正確な堆積年代を得るために、いかに未露光粒子を多く含む測定結果を認識し、それを取り除くかという議論が不可欠である(例えば, Lamothe *et al.*, 1994; Olley *et al.*, 1998; Rittenour *et al.*, 2005)。一方、OSL 年代が鉱物粒子の露光年代を表す事実は、本年代測定法が堆積粒子の運搬・堆積状況を知るための手段となりうることを示唆している。そこで、現世の河川堆積物中の鉱物粒子の OSL 強度を測定し、その粒子が最近露光したか否かを判定することによって、通常堆積物と洪水堆積物中に含まれるアルカリ長石粒子の露光状況を比較した。その結果、河川における砂質粒子の運搬・堆積過程と粒子の露光に関して、いくつかの重要な知見を得ることができたので、ここに報告する。

II. 試料採取

2004 年には日本列島に多くの台風が来襲した。特に、10 月に日本列島を通過した台風 23 号は西日本へ記録的降雨をもたらし、多くの地域で河川の氾濫が生じた(例えば, 牛山, 2005)。近畿地方北部の由良川水系と円山川水系においても、数ヵ所で洪水が発生した。OSL 強度測定に基づく砂質粒子の露光状況の把握を目的として、氾濫原(水田)に堆積した洪水堆積物が農作業によって改変される前の 2005 年 1 月に、由良川水系と円山川水系において洪水堆積物の採取を行った(図 1)。洪水堆積物は水流による侵食の結果、河床堆積物の中に埋没していた粒子も含有し、その水系の堆積粒子の平均値により近

い情報を保有しているはずである。また、海域への砂質粒子の運搬は洪水時に極大となり、洪水堆積物の露光状況を把握することは、将来的に海域での砂質粒子の露光状況を検討する際にも重要となる。由良川水系では、通常堆積物として河床堆積物表面の砂粒子も採取し、洪水堆積物と露光状況の比較を行った。

1. 由良川水系

A 地点は由良川支流の岡田川が由良川本流に合流する地点近くである(図 2-A)。まず、洪水堆積物との対比を目的として、ポイントバー末端の砂州において試料を採取した。ここでは試料採取時の通常水位において表面の砂粒子の転動が認められており、“通常”堆積物とみなすことができる。通常時(昼間, 晴天時)の露光率を調べるため、砂州上面の水上露出部(A1)と水中斜面(水深約 10 cm, A2)の表層約 1 cm 部分の砂粒子を採取した。

次に、近傍の別のポイントバー上面より洪水堆積物(A3)を採取した。ポイントバー本体は、おもに中礫から粗粒砂より構成されているが、その上面に植物片を多く含んだ層厚 20 cm 以上のシルト質細粒～極細粒砂が堆積する。上部には植物片の濃集層が 3 枚挟まれ、最上部を層厚 3 cm の砂質シルトが覆う。これらポイントバー上面の堆積物は、試料採取時に河水面より 1 m 以上高位に位置していた。国土交通省水文水質データベース(水情報国土データ管理センター, 2005)において 2004 年 10 月から 2005 年 1 月にかけての由良川本流の大川橋観測所(観測所記号 306091286605080)における水位変化を調べ、これらのシルト質砂は台風 23 号襲来時か、それ以降に形成されたと判断した。洪水堆積物の採取は直径約 4 cm, 長さ 20 cm の塩化ビニルパイプを打ち込むことによって行った。また、植物片濃集部は氾濫直後の滞水時

図 1 試料採取地点(A～C)と由良川・丸山川水系

Fig. 1 Location map of the Yura and Maruyama river systems and sampling sites A to C

期に浮流していた植物片が堆積したものと判断し、試料処理時に暗室内で植物片濃集層より上位の堆積物を取り除いた。また、下端の堆積物も採取時に露光している可能性があるため、5 cm 程度を取り除いた。したがって分析に供したパイプ中央部の試料は、増水時に運搬、堆積した堆積物であり、堆積時の露光状況を保持している。

B 地点は由良川本流に沿って A 地点から約 4 km 下流側に位置する。採取地点は河道から約 200 m 離れた水田上であり（図 2-B）、越水による氾濫が生じた結果、砂質泥が厚さ 30 cm 以上堆積した。台風 23 号の襲来時以降

試料採取時まで、由良川流域での氾濫はほかにはなく、これらの堆積物が台風 23 号の襲来時に形成されたことは確実である。ここでも長さ 20 cm の塩化ビニルパイプを A 地点同様に打ち込み、露光の可能性がある両端の堆積物を暗室内で取り除いた上で、試料を分析した。

2. 円山川水系

C 地点は由良川の西隣の水系にあたる円山川の主要な支流、出石川沿いの氾濫原上に位置する。本地点近傍では、破堤によって水田地帯と市街地に河川水が流れ込んだ。採取地点においても水流の強さを反映し、砂堆が形

図 2 試料採取地点の詳細位置と採取時の状況

それぞれ国土地理院発行 1/25,000 地形図「内宮」、「西舞鶴」、「江原」を使用。(A) 試料 A1～A3 採取地点、(B) 試料 B 採取地点、(C) 試料 C 採取地点。矢印は水流の方向を表す。

Fig. 2 Detailed localities and photographs of sites A to C

Maps in (A), (B) and (C) are based on 1 : 25,000 scale topographic maps “Naiku”, “Nishimaizuru” and “Ehara”, respectively. Bold arrows in the (C) show direction of flood stream from a broken levee.

成されている(図2-C)。試料を採取した砂堆の長さは約1 m, 高さは約0.4 mであり, 中礫から中粒砂へと顕著な級化を示し, 最上面は厚さ約1 cmのシルト層で覆われている。台風23号の襲来時に降試料採取時まで, 円山川流域での氾濫はほかにはなく, これらの堆積物が台風23号の襲来時に形成されたことは確実である。砂堆上部の砂質部分を選択的に採取するために, 塩化ビニルパイプを斜めに打ち込み, 他の試料同様に露光の可能性のある両端の堆積物を暗室内で取り除いた上で, 試料を分析した。

III. 試料処理および測定

1. 試料処理

本研究では, おもにアルカリ長石のOSL強度を測定した。アルカリ長石のOSL年代は, 石英の年代に比べて, 信頼性が低いと判断されることが多い(例えば, Wallinga *et al.*, 2001)。しかし, アルカリ長石は一般に石英に比べOSL強度が強く(例えば, 塚本ほか, 1999), また鉱物内に ^{40}K などの放射性同位元素を石英より多く含むため(例えば, Aitken, 1998), 石英より短い埋積期間でOSL信号を検出することが可能であり, 現世堆積物の露光状況の評価に適している。また, 日本列島のように活発な火成活動・地殻変動が進行している大陸外縁帯では, 一般に碎屑物中の長石含有量が多く, アルカリ長石を用いてOSL強度測定を行うことの意義は大きい。なお, 長石は石英と異なり, 赤外線により効率的に発光するため, 長石のOSL強度を測定する際には赤外線(IR)を照射することが一般的であり, IRを用いた長石のOSLを特にIRSLと呼ぶ。

自然状態のOSL強度を保持するために, 以下の試料処理は暗室内で, OSLおよびブリーチを起こしにくいオレンジ光源下(波長 $600 \pm 50 \text{ nm}$)で行われた。(1)フルイ上で水洗し, 粒径 $300 \sim 180 \mu\text{m}$ の粒子を選別する。(2)濃度10%の過酸化水素水に4時間以上浸すことにより, 有機物を除去する。(3)濃度10%の希塩酸に約2時間浸すことにより, 炭酸塩を除去する。(4)比重を約 2.6 g/cm^3 に調整したLST重液(長谷部, 1999)を用いて, 石英や有色鉱物からなる重鉱物成分と, アルカリ長石などからなる軽鉱物成分に分離する。(5)実体顕微鏡下で軽鉱物成分からアルカリ長石粒子を選別し, シリコングリースを用いて, 直径約1 cmの測定用ステンレスディスク中央部に粒子を1個ずつ接着する。

また, アルカリ長石の露光状況と比較するために, 砂州表層堆積物試料, A1およびA2から石英の抽出を

行った。試料処理(4)でLST重液により分離した重鉱物成分を40%のフッ化水素酸に1時間, その後36%の塩酸に1時間浸すことにより, 石英以外の鉱物を除去し, 抽出された石英粒子を1個ずつ測定用ステンレスディスクへ接着した。

2. OSL強度測定

OSL年代測定法は, 測定されたOSL強度から鉱物に吸収された線量を推定することにより, 石英・長石などの露光年代を過去約十万年間にわたって見積もることができる。OSL強度から鉱物に吸収された線量(等価線量)を推定する際に最もよく用いられているのがSingle Aliquot Regenerative-dose Protocol(SAR法: Murray and Wintle, 2000)である。SAR法では, まず測定用試料のOSL強度(自然OSL強度)を測定する。測定もしくはその後に行う加熱や露光によって, 試料はブリーチされる。次に, 試料へ人為的に既知量の放射線を照射し, この放射線照射により生じるOSL強度を測定する。放射線照射とOSL強度測定を繰り返すことにより, その試料についての放射線量とOSL強度の検量線を作成し, はじめに測定した自然OSL強度を発するに必要な線量(等価線量)を見積もる。SAR法では一つの試料に対し, 放射線照射, 加熱, 光の照射を繰り返すうちに, 徐々に放射線に対する試料の応答性が変化する。つまり, 同量の放射線を照射しても, 励起されるOSL強度が変化してしまう。そこでMurray and Wintle(2000)は, OSL強度(L_x)を測定するたびに一定量の弱い放射線(テストدوز)を照射し, その放射線量に対するOSL強度(T_x)の変化を求めることにより, 応答性の変化を補正する手法を提唱した。具体的には L_x を直後に測定した T_x で規格化し, 無次元数 L_x/T_x を補正済みのOSL強度とする。 L_x/T_x を一つのユニットとし, 自然OSL強度(L_N/T_N)の測定後, 放射線の照射と L_x/T_x の測定を繰り返して検量線を作成する。詳しくは塚本(2004)などを参照されたい。SAR法ではそれまでの手法と異なり, ある測定試料, 場合によっては鉱物粒子1粒ごとの固有の等価線量を見積もることが可能であり, この手法の開発以降, OSL年代測定法は広く第四紀研究者に利用されるようになった。 γ 線スペクトロメトリーなどにより, 周辺の環境から年間あたりに発生する自然放射線量を推定し, これに試料採取箇所到達する宇宙線量の影響を加えることによって得られた年間線量(dose rateもしくはannual dose)で等価線量を除することにより, OSL年代を得る。

通常のOSL年代測定に伴う議論では, 測定試料(鉱物

粒子 1~数千個) の等価線量を求めた上で、得られた等価線量のばらつきの原因として鉱物粒子の露光/未露光の個体差のほかに、局所的な自然放射線量の差異、生物擾乱等による上下の堆積物の混入などをあげている(例えば, Olley *et al.*, 2004). 本研究では現世堆積物を対象とするため、自然放射線量の差異と堆積物の混入による影響を最小限に抑えることができ、鉱物粒子の露光/未露光に関して議論の焦点を絞ることができる。また、年代を得ることが目的ではなく、堆積粒子が近年露光したか否かを判断することが目的であるため、通常の OSL 年代測定で必須の等価線量および年間線量の推定は行わない。

1) 長石の露光判別

本研究の目的は、現世の堆積粒子がごく最近に露光したか否かを判定することである。ごく最近露光した粒子は基本的には OSL 信号を発しないので、自然 OSL 強度 (L_N/T_N) を測定すれば露光、未露光の判別は可能はずである。単純に OSL 強度 (L_N) を用いずに L_N/T_N を使用するのには、応答性の変化を補正することに加え、 T_N を測定することにより、その粒子が放射線を浴びると OSL 信号を発する性質を有しているか確認し、また各粒子固有の発光強度の大小を補正するためである。しかし、露光した粒子の OSL 信号強度が 0 とならない recuperation (例えば, Aitken and Smith, 1988) という現象が知られている。この recuperation は、プレヒートにおいて粒子を加熱することにより生じる thermal transfer によって引き起こされる(例えば, Wintle and Murray, 2006)。本来、プレヒートの目的は熱的に不安定なトラップ内の電子をあらかじめ除去し、OSL 信号を安定的に検出することであるが、その際に熱的に不安定なトラップから OSL トラップへ電子が遷移してしまうのが、この thermal transfer である。

本研究では recuperation の問題を解決するために、以下のように露光、未露光の判定を行うことにした。ディスク上に接着された長石粒子にまずプレヒートを施す。アルカリ長石のプレヒート条件は Auclair *et al.* (2003) などで用いられている値 (250°C, 60 秒間) を予察的に採用し, Blair *et al.* (2005) などに従い、テストドーズ照射後の加熱(カットヒート)もプレヒートと同条件としたが, thermal transfer を起こしにくい最適なプレヒート条件については、今後も検討を重ねる必要がある。プレヒートを行った後、赤外線 (~870 nm) をアルカリ長石粒子に照射し励起発光を促す。SchottBG-39 と Corning 7-59 を組み合わせたフィルターにより、発光スペク

図 3 本研究における IRSL の測定と露光判別手順

Fig. 3 Procedures for IRSL measurement and judgment of bleached/un-bleached grain

トルから青色光成分 (320~480 nm) を取り出す。IRSL 信号 (L_N) の測定は 50°C にて 100 秒間行い、 L_N 測定後にテストドーズとして β 線源 ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) より約 9 Gy の線量を照射し、もう一度 L_N とまったく同じ条件で IRSL 強度 (T_N) を測定する。その結果、粒子の放射線への応答性の変化を補正した IRSL 強度 (L_N/T_N) が得られる。 L_N/T_N の測定後、直射日光下で粒子を露光させる。露光時間は太陽高度を考慮し、夏期は約 4 時間以上、冬期は約 7 時間以上とした。その後 L_N/T_N と同じ条件で、もう一度補正済み IRSL 強度 (L_B/T_B) を測定する(図 3)。 L_B/T_B は、その粒子の recuperation の効果を表している。測定誤差の範囲内で L_N/T_N と L_B/T_B が一致した場合、その粒子はごく最近、つまり堆積直前に露光していたことになる。 L_N/T_N と L_B/T_B を直接比較して必要な情報(露光/未露光)のみを得ることにより、なるべく多くの測定個数を得るように努めた。

各試料あたり 150~200 個の粒子の測定を行い、[露光粒子の個数]/[有効測定個数]を計算し、露光率を算出した。測定結果の解析には Risø 研究所製の解析ソフト Analyst を使用した。図 4 は L_N および T_N 測定の一例である。100 秒間の測定時間のうち、0~10 秒の平均カウント数を IRSL 信号、80~100 秒の平均カウント数をバックグラウンドとして、IRSL 信号からバックグラウンドレベルを差し引き、 L_N と T_N をそれぞれ求める。テストドーズの照射による IRSL の強度が小さく、IRSL 信号を検出できない場合、そのデータは採用されない。

図 4 アルカリ長石粒子の IRSL カーブの一例
(A) 自然状態での IRSL カーブ, (B) テストドーズ照射後の IRSL カーブ.

Fig. 4 An example of IRSL decay curve of L_N (a) and T_N (b)

OSL 強度の測定誤差には, 装置自体の測定誤差と, OSL 信号を検出する際の統計的な誤差が含まれる. 装置自体の測定誤差として, Thomsen *et al.* (2005) によって得られた Risø TL/OSL DA-15 の相対誤差 3.3% を仮定した. OSL 信号を検出する際の統計的な誤差は L_x/T_x を算出する際に, 解析ソフト Analyst によって自動的に算出される.

2) 判別方法の妥当性の検討

次に, 本研究で用いている同一粒子を 2 回測定し, L_N/T_N と L_B/T_B を比較する手法の妥当性を判断するために, 粒子分割測定を行った. 粒径 $500 \sim 300 \mu\text{m}$ のアルカリ長石粒子を選別した後, 鏡下で静かに分割する. Huot and Lamothe (2003) によると, 同一の長石粒子を分割した場合, 双方の IRSL 的性質は同じといって差し支えない. 一方の粒子を L_N/T_N 測定後に露光させて, L_B/T_B を測定する. もう一方の粒子は L_N/T_N の測定を行わずに露光させ L_B/T_B を測定する (L_B/T_B^* とする). 仮に, L_B/T_B と L_B/T_B^* が一致しない場合, L_N/T_N の測定により粒子に thermal transfer などの何らかの悪影響が補正不可能なほど及ぼされていることになる. 24 個の長石粒子について L_B/T_B と L_B/T_B^* を測定, 比較した結果 (図 5), 21 個の粒子については測定誤差の範囲内で L_B/T_B と L_B/T_B^* が一致した. 残りの 3 個の粒子での不一致の原因は不明であるが, 87% の粒子で L_B/T_B と L_B/T_B^* の値が誤差の範囲内で一致しており, 同一粒子の L_N/T_N と L_B/T_B を比較することにより, 粒子の露光状況を判別して問題ないと判断される.

3) 石英粒子の露光判別

A 地点の砂州上面の水上露出部 (A1) と水中斜面 (A2) から抽出した石英粒子の OSL 強度測定は, 以下のとおりである. 加熱条件は Olley *et al.* (1999) などで使用されている値を採用し, プレヒートは 220°C の加熱を 10

図 5 半割したアルカリ長石粒子の露光後の IRSL 強度の比較

Fig. 5 Comparison between L_B/T_B of a half of feldspar grains and L_B/T_B^* of another half of the corresponding grains

秒間, カットヒート条件を 160°C , 0 秒とした. 125°C で青色光 (約 470 nm) を 100 秒間粒子に照射し, U-340 フィルターにより励起光の紫外光成分 ($290 \sim 370 \text{ nm}$) の強度を読み取る. これらの石英粒子は数秒間でブリーチされる, いわゆる fast 成分 (例えば, 塚本・岩田, 2005) をほとんど有していないため, 石英としては 0~10 秒と長めに OSL 信号を読み取り, BG の取得期間を 80~100 秒とした. テストドーズは長石と同様, 約 9 Gy である. テストドーズ照射後, まず赤外線を照射し, IRSL 信号の有無を確認する. IRSL 信号を発する粒子は長石であるので, そのデータは解析対象から除く. その後, L_N と同じ条件で T_N を測定し, 最終的に L_N/T_N を得る. 石英についても長石同様に, 4 時間以上日光に当てた上で L_B/T_B を測定し, L_N/T_N と L_B/T_B の比較に基づき露光/未露

表 1 各サンプルの有効なデータを取得できた粒子の個数, 露光している粒子数, 露光率

Table 1 Acceptable number and bleached number of grains and bleaching percentage of each sample

	Sample code	Number of grains		Bleaching percentage
		Acceptable	Bleached	
Quartz	A1 (Active bar top)	21	10	48
(OSL)	A2 (Active bar slope)	26	7	27
Feldspar	A1 (Active bar top)	33	21	64
(IRSL)	A2 (Active bar slope)	34	26	76
	A3 (Flood deposit)	26	17	65
	B (Flood deposit)	39	14	36
	C (Flood deposit)	34	16	47

光を判別した。

IV. 結果および議論

表 1 に各試料の露光状況を示す。由良川, 円山川水系における長石・石英粒子の露光率をまとめると, 以下のようになる。

(1) 砂州水上部表面における石英の露光率は 48% と比較的高いが (図 6-A), 水中部表面では 27% とほぼ半減する (図 6-B)。

(2) 砂州表面における長石の露光率は, 水上部 (64%, 図 6-C) と水中斜面 (76%, 図 6-D) で比較的に通っている。

(3) 洪水堆積物中の長石の露光率は 36~65% (図 7) と

図 6 現世の砂州表面堆積物の露光状況

L_N/T_N が 1.5 を超えるものには上向き矢印をつける。露光粒子の L_N/T_N は黒い四角で表す。(A) 砂州水上部 (サンプル A1) の石英, (B) 砂州水中斜面 (サンプル A2) の石英, (C) サンプル A1 のアルカリ長石, (D) サンプル A2 のアルカリ長石。

Fig. 6 Comparisons between L_N/T_N and L_B/T_B of active sand bar surface samples

Upward arrows means high (>1.5) L_N/T_N intensities. (A)–(B) results of quartz grains taken from bar-top (sample A1) and bar-slope (sample A2), respectively. (C)–(D) results of feldspar grains taken from samples A1 and A2, respectively. Bleached grain which has a correspondence of L_N/T_N with L_B/T_B are shown as open square.

図 7 現世洪水堆積物の露光状況

(A) 由良川支流の礫州上の堆積物 (サンプル A3), (B) 由良川本流沿いの水田上の堆積物 (サンプル B), (C) 出石川沿いの破堤堆積物 (サンプル C).

Fig. 7 Comparisons between L_N/T_N and L_B/T_B of feldspar grains from flood deposit samples
(A) Result of flood deposits on gravel bar (sample A3).
(B) Result of flood plain deposits (sample B). (C) Result of sand-gravel dune on flood plain (sample C).

かなりの幅がある。

1. 砂州表面の露光率

Godfrey-Smith *et al.* (1988), 幡谷・白井 (2003) などの実験結果から, 直射日光の照射により石英粒子がブリーチする時間は数分以内, 長石粒子がブリーチする時間は 10 分程度と考えられる。つまり, 同じ露光条件下では石英の露光率の方が高くなることが期待されるが, 実際には石英の露光率は, 水中斜面部では長石の半分以下であった。これは試料中の石英粒子が fast 成分を保持しない感光性の悪い粒子 (塚本・岩田, 2005) に富むこと, 石英粒子を効率的にブリーチさせる紫外線 (例えば, Bøtter-Jensen *et al.*, 1994) が水に吸収されるため, 長石の選択的なブリーチが生じる (例えば, Sanderson *et al.*, 2003) などが原因であると考えられる。砂州水上部表面においても, 石英の露光率は長石より若干低い, 感光性の悪い石英が多く, また水上部も河川水で濡れているため, 石英のブリーチが若干阻害されているのであろう。一方, 長石の露光率は水中斜面部で砂州上面よりわずかながらも高い。砂州上面の砂粒子は河川水の微妙な水位の上昇時に少しずつ転動しており, 水中斜面部においてはその場で露光した長石に加え, 砂州上面で露光した後転動した粒子が加わることで, 露光率を上昇させている可能性がある。同様の効果が石英粒子でも生じていると考えると, 水中斜面部における石英の露光率には, 砂州上面から移動した露光粒子の寄与があり, 水深約 10 cm の砂州斜面における石英粒子の露光率は, 実際には 27% より小さいと考えられる。

Olley *et al.* (1999) などでは, 複数の粒子をまとめて測定する場合, 露光していない粒子の混入が容易に等価線量の増大, すなわち partial bleaching を招くことを示している。本研究で測定したサンプルの露光率は最大でも 70% 台であり, 複数粒子を同時に測定する方法では有意義な OSL 年代を得られない可能性が高い。

2. 洪水堆積物の露光率

洪水堆積物は水流による侵食の結果, 河床堆積物の中に埋没していた粒子をも含有し, その水系の堆積粒子の平均的な値により近い情報を保有しているはずである。通常堆積物表面の長石粒子露光率が約 70% であることを考慮すると, 洪水堆積物試料 (A3, B, C) の露光率が 35% 以上ということは, 露光粒子の含有率が相当に高いといえる。理由の一つとして, 洪水堆積物中に流路外の地表に存在していた露光粒子が混入している可能性が上げられる。しかし, 由良川支流の A 地点は河道内に位置しており, 地表の粒子が流路外から流れ込んだとしても

それだけで高い露光率を説明できるとは考えにくい。また、流路外の B 地点と C 地点は水田地帯に位置しており、砂粒子の大部分は河道から流れ出したと考えるのが自然である。これらを考慮すると、洪水堆積物の露光率が高いということは、流路内の河床堆積物の全体的な露光率自体が高いことを示していると考えるのが合理的であろう。すなわち、通常の状態では河床の砂粒子は短距離の運搬および堆積を繰り返し、その結果、ごく最近露光した砂粒子は河床表面のみならず、河床堆積物内部にも多く存在すると解釈される。

次に、各採取地点における露光率の差について考察する。一般に OSL 年代測定研究においては、運搬距離が大きくなるに従い、ブリーチした粒子が増えると考えられている（例えば、Stokes *et al.*, 2001 ; Singarayer *et al.*, 2005）。しかし、本研究での試料採取地点から源流域までの河道の距離は、B 地点では約 130 km であるのに対し、A 地点では 20 km 以下、C 地点では約 40 km であり、露光率と源流域までの距離の間に因果関係は見られない。粒子の運搬距離と試料採取地点から源流域までの距離は同じとは限らないが、由良川本流の露光率が支流の露光率より低いということは、粒子の運搬距離以外にも露光率に大きく影響を与える要素の存在を示している。また、由良川および円山川の流域の岩質や河床勾配などは比較的似通っており、河川系の違いが露光率の差異に影響を与えているとも考えにくい。そこでもう一度、試料採取地点および周辺の状況を整理する。試料 A3 の採取地点は河道内のポイントバー本体上面である。このポイントバーの上流側の河道は直線状に整形されており、通常時には砂州が河道内を左右交互に配列し、水路はその間を通る。一方、試料 B を採取した由良川下流は河道勾配がきわめて小さく、通常時も堤防内の河道のほぼ全体が水で満たされており、砂州の露出はきわめて限られている。試料 C は円山川支流の出石川沿いの水田上に位置する砂堆から採取された。採取地点の上流側では、出石川の河道に砂州が比較的よく露出する。露光率の高いサンプル A3 および C と、露光率のやや低いサンプル B を比較すると、双方の大きな違いとして、河道における砂州の露出状況があげられる。すなわち、長石粒子は水量が少なく、砂州の露出が顕著な河川上流や支流においてかなりの確率で露光するが、河道が水で満たされ、水路の底を砂堆が移動する本流、特に下流域ではあまり露光しないと推定される。

河川はその形態などから、しばしば網状河川と蛇行河川に分類される。網状河川は堆積物供給量に比べて水量

が少なく、水路間に小規模な砂州が配列する。一方、蛇行河川は一般に堆積物供給量に比べて水量が多い（例えば、Ferguson, 1987 ; Huisink, 2000 ; Simpson and Smith, 2001 ; Leigh *et al.*, 2004）。日本の河川は現在大規模な河川改修が進み、河道の形状を単純に分類することは難しいが、支流の岡田川および出石川は網状河川の一種である直線状河道（例えば、八木下, 2001）に、由良川本流は蛇行河川に分類されることになる。本研究の結果からは、網状河川堆積物の方が蛇行河川堆積物より露光率が高い、すなわち、OSL 年代測定用試料としてより有用である可能性が示される。鉱物粒子のブリーチには、水質、気候条件、植生なども深く関わっており、単純に網状河川において砂粒子が露光しやすいと断定することはできない。また、現世における砂質粒子の運搬にはダム建設による影響も大きいであろう。しかし、ロアーヌ河の上流から下流にかけて OSL による等価線量の変化を求めた Stokes *et al.* (2001) は、石英サンプルの等価線量ははじめの 100 km 以内で急激に減少すること、また支流からの堆積粒子の供給は、基本的には等価線量の値に大きな変化をもたらさないことを述べている。これらも網状河川の卓越する上流部および支流で粒子の露光が急速に進むと考えることで説明可能である。なお、これらの論文では石英粒子を用いているが、日本とは異なって長距離かつ緩傾斜の大陸河川での、より長時間をかけての堆積粒子の運搬が、感光性のよい大陸の石英のブリーチに寄与するものと推定される。

また、河川堆積物試料において粗粒な粒子ほどよくブリーチしているとの報告がある（例えば、Olley *et al.*, 1998 ; Truelsen and Wallinga, 2003 ; Thomas *et al.*, 2005）。これらの論文ではいくつかの可能性をあげているが、本研究の結果からは、網状河川の環境の多い河川の上流・支流で堆積しやすい粗粒な粒子ほど、効率的に露光するという可能性を支持する。

3. 露光率解析の意義とその将来性

以上に示したように、網状河川堆積物には蛇行河川堆積物に比べ、堆積直前に露光し OSL 年代測定に適した砂粒子がより多く存在すると考えられる。また蛇行河川堆積物においても、自然堤防の破壊に伴うクレバススプレー堆積物などには、流路外の氾濫原表面に存在していた露光粒子がより多く含まれる可能性がある。これらの予測については今後測定事例を蓄積して確認する必要があるものの、急峻かつ河川延長の短い日本列島では河川堆積物の露光が大陸に比べて少ないことが予想されるので、河川堆積物の OSL 年代測定用試料を採取する際に、

今後留意すべき点であろう。

堆積物の何%が露光しているかという議論は、OSL年代を求める際にも Olley *et al.* (1998) などによって行われてきた。しかし、求めた等価線量の誤差の情報が入らないということなどの理由により(例えば, Thomas *et al.*, 2005), 最近はさほど重要視されていない。今回示したように、露光率からはまだ多くの情報を引き出すことができる。特に現世堆積物に関しては、従来のOSL研究で行われているように等価線量を求めなくても、OSL強度(L_x/T_x)測定により十分議論に耐えうるデータを簡便に得ることが可能である。

本研究でも扱ったように、砂質鉱物粒子は河川を運搬されている間は露光の機会を有するが、河口より海域へと運び込まれると、汀線部を除いて露光の機会はほとんどあり得ない。つまり、河口付近から露光率の変化を追跡しトレーサーとして扱うことにより、現世海成粗粒堆積物の運搬・堆積の過程をこれまでと違った精度と規模で解釈することが可能となると期待される。従来、年代測定法としてのみ利用されてきたOSL現象を運搬・堆積作用の指標としても活用することにより、今後、堆積学、河川・海岸工学などに新たな知見を加えることが可能であろう。

V. ま と め

OSL強度測定に基づく露光率解析と河川堆積物の堆積環境についての考察を組み合わせることにより、現世河川堆積物中の砂質粒子の運搬・堆積作用と露光状況の関連性について、以下の推定を行った。

砂州水上部～浅い水中部の表面近くで、アルカリ長石粒子は高い確率で露光する。一方、水中における石英粒子の露光は限られている。

砂粒子は基本的に侵食・運搬・堆積過程を繰り返しながら河川系を下流へ移動し、この過程で河床堆積物中の多くの長石粒子が露光する。特に、河川の上流および支流部では砂州の露出が多いため、長石粒子は効率的に露光する。一方、本流、特に下流部では一般に水量が増え、砂州の露出が限られるため、長石粒子が露光する機会は少なくなる。

以上より、網状河川堆積物にはOSL年代測定に適した露光粒子がより多く存在すると期待される。また、氾濫原中のクレバスプレー堆積物も、相対的に高い露光率を有すると思われる。

本研究はOSL強度測定を年代測定以外に適用した、希少かつ貴重な例といえる。今回の推定に基づき、今後

ケーススタディを蓄積することにより、砂質堆積物の運搬・堆積過程に関して、新しい見地からの解析が可能になると期待される。

謝辞 本研究を進めるにあたり、OSL測定については東京大学の宮入陽介博士、首都大学東京の大石雅之博士ならびにRI研究施設にご協力いただいた。また東京大学海洋研究所海洋底科学部門、首都大学東京地理環境コースの諸氏には、測定結果についてたびたび議論をしていただいた。編集委員の佐々木圭一博士と査読を担当して下さった長谷部徳子博士にいただいたコメントは、丁寧かつ建設的なものであり、本稿を改善する上で非常に役に立った。試料採取ならびに分析には、2004年度住友財団基礎科学研究助成金(研究代表者: 白井正明, 助成番号: 040212)を使用させていただいた。ここに記して厚く御礼申し上げます。

引用文献

- Aitken, M.J. (1998) An introduction to optical dating. 267 p, Oxford Science Publications.
- Aitken, M.J. and Smith, B.W. (1988) Optical dating : recuperation after bleaching. *Quaternary Science Reviews*, 7, 387-393.
- Auclair, M., Lamothe, M. and Huot, S. (2003) Measurement of anomalous fading for feldspar IRSL using SAR. *Radiation Measurement*, 37, 487-492.
- Bailey, R.M., Singarayer, J.S., Ward, S. and Stokes, S. (2003) Identification of partial resetting using D_e as a function of illumination time. *Radiation Measurements*, 37, 511-518.
- Blair, M.W., Yukihiro, E.G. and McKeever, S.W.S. (2005) Experiences with single-aliquot OSL procedures using coarse-grain feldspars. *Radiation Measurements*, 39, 361-374.
- Bøtter-Jensen, L., Duller, G.A.T. and Póolton, N.R.J. (1994) Excitation and emission spectrometry of stimulated luminescence from quartz and feldspars. *Radiation Measurements*, 23, 613-616.
- Colls, A.E., Stokes, S., Blum, M.D. and Straffin, E. (2001) Age limits on the late Quaternary evolution of the upper Loire River. *Quaternary Science Reviews*, 20, 743-750.
- Ferguson, R.I. (1987) Hydraulic and sedimentary controls of channel pattern. Richards, K. (ed.) *River*

- channels : Environments and processes : 129-158, Blackwell Pub.
- Godfrey-Smith, D.I., Huntley, D.J. and Chen, W.H. (1988) Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extracts. *Quaternary Science Reviews*, 7, 373-380.
- 長谷部徳子 (1999) 重液 LST の試用. *フィッシュン・トラックニュースレター*, 12, 43-44.
- 幡谷竜太・白井正明 (2003) 浅海成堆積物の OSL 年代. *第四紀研究*, 42, 347-359.
- Huisink, M. (2000) Changing river styles in response to Weichselian climate changes in the Vecht valley, eastern Netherlands. *Sedimentary Geology*, 133, 115-134.
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I. and Thewalt, M.L.W. (1985) Optical dating of sediments. *Nature*, 313, 105-107.
- Huot, S. and Lamothe, M. (2003) Variability of infrared stimulated luminescence properties from fractured feldspar grains. *Radiation Measurements*, 37, 499-503.
- Lamothe, M., Balescu, S. and Auclair, M. (1994) Natural IRSL intensities and apparent luminescence ages of single feldspar grains extracted from partially bleached sediments. *Radiation Measurements*, 23, 555-561.
- Leigh, D.S., Srivastava, P. and Brook, G.A. (2004) Late Pleistocene braided rivers of the Atlantic Coastal Plain, USA. *Quaternary Science Reviews*, 23, 65-84.
- Lian, O.B. and Roberts, R.G. (2006) Dating the Quaternary : progress in luminescence dating of sediments. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2449-2468.
- 水情報国土データ管理センター (2005) 国土交通省水文水質データベース. <http://www1.river.go.jp/>, 国土交通省河川局.
- Murray, A.S., Olley, J.M. and Caitcheon, G.G. (1995) Measurement of equivalent doses in quartz from contemporary water-lain sediments using optically stimulated luminescence. *Quaternary Science Reviews*, 14, 365-371.
- 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.
- Olley, J.M., Caitcheon, G.G. and Murray, A.S. (1998) The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquot of fluvial quartz : implications for dating young sediments. *Quaternary Science Reviews*, 17, 1033-1040.
- Olley, J.M., Caitcheon, G.G. and Roberts, R.G. (1999) The origin of dose distributions in fluvial sediments, and the prospect of dating single grains from fluvial deposits using optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements*, 30, 207-217.
- Olley, J.M., Pietsch, T. and Roberts, R.G. (2004) Optical dating of Holocene sediments from a variety of geomorphic settings using single grains of quartz. *Geomorphology*, 60, 337-358.
- Rittenour, T.M., Goble, R.J. and Blum, M.D. (2005) Development of an OSL chronology for Late Pleistocene channel belts in the lower Mississippi valley, USA. *Quaternary Science Reviews*, 24, 2539-2554.
- Sanderson, D.C.W., Bishop, P., Stark, M.T. and Spencer, J.Q. (2003) Luminescence dating of anthropogenically reset canal sediments from Angkor Borei, Mekong Delta, Cambodia. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1111-1121.
- Simpson, C.J. and Smith, D.G. (2001) The braided Milk River, northern Montana, fails the Leopold-Wolman discharge-gradient test. *Geomorphology*, 41, 337-353.
- Singarayer, J.S., Bailey, R.M., Ward, S. and Stokes, S. (2005) Assessing the completeness of optical resetting of quartz OSL in the natural environment. *Radiation Measurements*, 40, 13-25.
- Stokes, S., Bray, H.E. and Blum, M.D. (2001) Optical resetting in large drainage basins : tests of zeroing assumptions using single-aliquot procedures. *Quaternary Science Reviews*, 20, 879-885.
- 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*, 39, 53-68.
- Thomas, P.J., Jain, M., Juyal, N. and Singhvi, A.K. (2005) Comparison of single-grain and small-aliquot OSL dose estimates in <3,000 years old river sediments from South India. *Radiation Measurements*, 39, 457-469.

- Thomsen, K.J., Murray, A.S. and Bøtter-Jensen, L. (2005) Sources of variability in OSL dose measurements using single grains of quartz. *Radiation Measurements*, 39, 47-61.
- Truelsen, J.L. and Wallinga, J. (2003) Zeroing of the OSL signal as a function of grain size : Investigating bleaching and thermal transfer for a young fluvial sample. *Journal on Methods and Applications of Absolute Chronology*, 22, 1-8.
- 塚本すみ子 (2004) 光ルミネッセンス (OSL) 年代測定における蓄積線量の推定法. *放射線と産業*, 101, 42-47.
- 塚本すみ子・福澤仁之・小野有五・大井圭一・方小敏 (1999) 中国レス堆積物の IRSL 年代測定. *国立歴史民俗博物館研究報告*, 81, 503-515.
- 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.
- 牛山素行 (2005) 2004 年 10 月 20~21 日の台風 23 号による豪雨災害の特徴. *自然災害科学*, 23, 583-593.
- Wallinga, J., Murray A.S., Duller, G.A.T. and Törnqvist, T.E. (2001) Testing optically stimulated luminescence dating of sand-sized quartz and feldspar from fluvial deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 193, 617-630.
- 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.
- 八木下晃司 (2001) 岩相解析および堆積構造. 222 p, 古今書院.
- Zhang, J.F., Zhou, L.P. and Yue, S.Y. (2003) Dating fluvial sediments by optically stimulated luminescence : selection of equivalent doses for age calculation. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1123-1129.

Transport-depositional processes of present fluvial deposits estimated from OSL intensity of sand-sized grains

Masaaki Shirai^{*1, a}, Sumiko Tsukamoto^{*2} and Reisuke Kondo^{*3}

Optically stimulated luminescence (OSL) is well known as “OSL dating” in the Quaternary chronological science field. On the basis of OSL intensities of a mineral grain in present sediments, we can judge whether the grain has been bleached or un-bleached during its transport process. We discuss the relationship between the percentage of bleached grains (bleaching percentage : BLP) in each sample and the transport process of fluvial sand grains. BLPs of alkali feldspar grains of active sand bar surface and flood deposits formed by typhoon No. 0423 (Typhoon Tokage) in autumn 2004 from two river systems in western Japan show that

alkali feldspar grains are well bleached upstream and in tributaries where sand-gravel bars evolve on/near the water surface, while the grains are not easily bleached downstream where the channel is filled with water. Taking into account depositional environments, bar-channel deposits in braided-river systems and crevasse-splay deposits in flood plain systems may offer well-bleached fluvial samples which are suitable for OSL dating. By adapting an OSL technique to sedimentological investigations, sedimentological perspectives and OSL dating technique can complement each other.

Keywords : present fluvial deposits, feldspar grains, OSL intensity, bleaching percentage, transport-depositional processes

*1 Ocean Research Institute, The University of Tokyo. 1-15-1 Minamidai, Nakano-ku, Tokyo, 164-8639, Japan.

*2 Leibniz Institute for Applied Geosciences. Stilleweg 2, 30655 Hannover, Germany.

*3 College of Humanities and Sciences, Nihon University. 3-25-40 Sakurajyosui, Setagaya-ku, Tokyo, 156-8550, Japan.

*a Corresponding author : shirai@ori.u-tokyo.ac.jp