

# 長石の熱ルミネッセンス特性及び光励起ルミネッセンスによる 天竜川・遠州灘流砂系での土砂移動過程の推定

岸本 瞬  
指導教員 佐藤慎司 教授

## 1. はじめに

近年、流砂系における土砂の問題として、海岸侵食やダム貯水池への堆砂、河床の低下やアーモコート化などが全国的に起こっており、全国有数の土砂生産のある天竜川・遠州灘流砂系においても、これらの土砂問題が発生している。問題の解決には流砂系全体の適切な土砂の流れを形成することが必要であり、そのためには現在、および過去の土砂移動過程を把握することが必要であるといえる。砂粒子自体が持つ特性であるルミネッセンス信号を用いた分析として、遠州灘海岸を対象に、岸本ら(2008)や小川ら(2009)は露光による減少速度が遅い熱ルミネッセンス(Thermoluminescence: TL)信号の測定・分析による沿岸方向の土砂供給・移動過程の推定を行い、石橋ら(2009)は露光による減少速度が速い光励起ルミネッセンス(Optically Stimulated Luminescence: OSL)を用いた年代測定によって海浜の発達過程の推定を行っている。しかし土砂粒子の輸送過程における露光は限定的であるため、定量的な議論では輸送過程で完全に信号がなくなること(パーシャルブリーチ)に対する補正が重要である。

本研究では、対象地域である天竜川の河道と河口砂州及び遠州灘海岸において、TL と OSL の双方を測定から流砂系の土砂移動過程の推定と TL と OSL の関係性の分析を行い、天竜川河口部においては TL と OSL の関係性の分析から得られる指標を元に土砂移動過程を推定し、加えてパーシャルブリーチを考慮した堆積年代の推定手法を確立することを目的とする。

## 2. 熱及び光励起ルミネッセンス信号の特性

自然界にはウランやトリウム、カリウムなどの放射性物質によって発せられた放射線や宇宙から飛来した放射線(宇宙線)があり、それらは鉱物粒子に放射線損傷を与え、不対電子があるエネルギー状態に励起される。その状態のときに外部から熱または光が加わると、励起した不対電子が元のエネルギー状態に回復し、減少したエネルギー分の蛍光発光が起こる。これをルミネッセンスと呼び、熱による発光を TL、光による発光を OSL という。(Aitken, 1998)

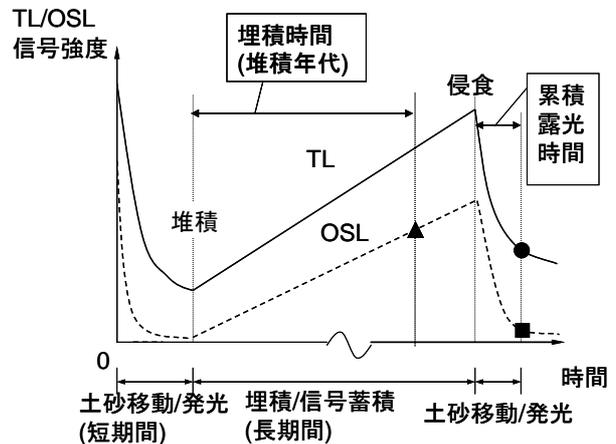


図-1 土砂移動とTL/OSL信号強度変化の概念図

TL・OSL 信号強度は鉱物内の励起不対電子量に比例し、不対電子量は鉱物の放射線被曝量にほぼ比例する。砂粒子の場合、埋積中は光が当たらず自然放射線のみがあたることにより増加するが、土砂移動中は光に当たることによって減少する。そのため土砂移動中の砂粒子の TL・OSL 信号強度は累積露光時間を表す。また、土砂移動中の露光による信号強度の減少は、TL よりも OSL の方が減少速度は速い。そのため OSL 信号強度は堆積時には露光により信号がほぼ 0 になる(完全ブリーチということ)が多く、その場合埋積している砂粒子の OSL 信号強度は堆積時間を表すことになる(図-1)。

## 3. 対象地域と測定方法

対象地域は、天竜川上流(三峰川との合流点)から河口まで、及び遠州灘海岸の御前崎から浜名湖の西までとした。地表面の砂試料採取は、露光を防ぐため黒色フィルムケースを用いて、堆積時間が信号の蓄積に対して無視しうると考えられる深さ 10cm の位置から採取した。天竜川河口砂州においては、堆積している地中の砂として、ジオスライサー調査による 3.5-4.5m のスラブ試料を採取し、また国土交通省からボーリング調査による 10m のコア試料を提供いただいた。試料採取位置を図-2 に示す。なお以後試料名は図-2 に示した名称を用いる。

なお図-2 の河口砂州において、太線は 2007 年 7 月の台風 4 号による砂州決壊時の汀線、細線は 2009 年 7 月の砂州回復後の汀線であり、ボーリングによるコア試料は砂州決壊前、ジオスライサーに

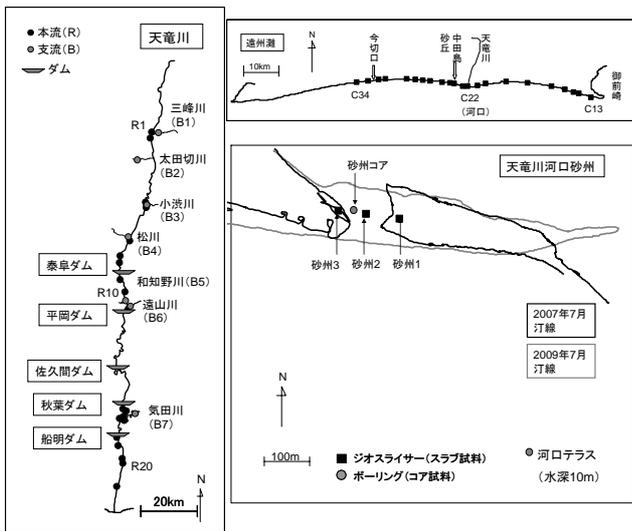


図-2 対象地域と試料採取位置

よるスラブ試料は砂州が回復している期間に採取されたものであり、堆積時期が異なる。

測定に用いるカリ長石を抽出するため、暗室内でオレンジ光のもと、ふるいわけにより 180-300 $\mu$ m (TL・OSL 測定用) と 300-500 $\mu$ m (年代測定用) の砂を取り出し、15%過酸化水素水で有機物を、18%塩酸で炭酸塩を除去した後、比重 2.58 の重液で比重 2.53-2.58 のカリ長石を抽出した。その後年代測定に用いるカリ長石のみ $\alpha$ 線の影響を除くため 46%フッ酸でエッチングをし、35%塩酸でフッ化物を除去した。この長石粒子をステンレスディスクに単層固定し、Risø TL/OSL Reader DA-20 で測定した。

本研究では、深さ 10cm の試料は露光状態の差異をみることで土砂移動過程を推定するために TL・OSL 信号強度測定を、天竜川河口部の試料は露光状態の差異に加え、堆積年代を推定するために TL 信号強度測定と OSL 測定による年代推定を行った。

測定方法は、TL 信号強度は岸本ら (2008) に準じて、平均値を取る温度範囲を 260-380 $^{\circ}$ C として行い、OSL による年代推定は SAR (Single Aliquot Regenerative-dose) 法 (Murray and Wintle, 2000) を用い、測定条件は石橋ら (2009) に準じた。また OSL 信号強度は石橋ら (2009) の測定条件を参考に表-1 の測定手順で行った。手順 6 の測定から得られる OSL 信号 (図-3) の測定時間 90-100 秒の 10 秒間の測定値の和をバックグラウンド値 (BG) とし、手順 2 から得られる OSL 信号の測定時間 0-2 秒の 2 秒間の和 (Lx) から 2 秒分換算した BG 値を引いたものを、手順 6 の基準 OSL 測定の測定時間 0-2 秒の和 (Tx) から 2 秒分換算した BG 値を引いたもので割ることにより正規化し、その値を OSL 信号強度とした。以下に式を示す

$$OSL\text{信号強度} = \left( Lx - \frac{2}{10} BG \right) / \left( Tx - \frac{2}{10} BG \right) \quad (1)$$

表-1 OSL信号強度測定手順

手順	内容	目的
1	予熱処理 (140 $^{\circ}$ C/10s)	不安定なOSL信号の除去
2	OSL 測定	測定時間100秒 赤外線照射
3	450 $^{\circ}$ C/30s加熱	残渣OSL信号の除去
4	人工放射線照射	$\beta$ 線5s (0.9Gy)照射
5	予熱処理 (160 $^{\circ}$ C/0s)	手順 1 と同様
6	基準 OSL 測定	手順2と同様/正規化のため

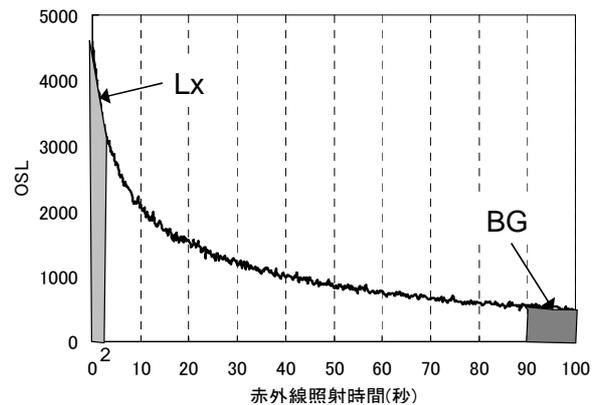


図-3 OSL測定結果例

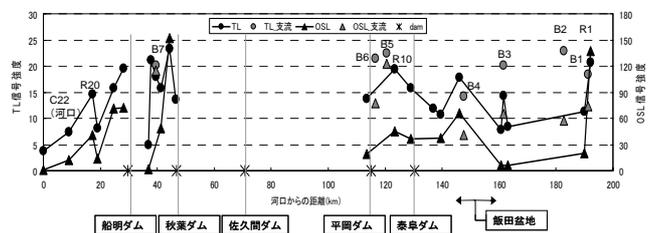


図-4 河川域でのTL・OSL信号強度変化

## 4. 測定結果と考察

### 4.1 天竜川

天竜川及びその支流の TL・OSL 測定結果を図-4 に示す。露光に対する感度がよい OSL 信号強度も完全にはブリーチされず、TL・OSL はともに露光の程度を示していると考えられる。

図-4 から支流は天竜川本流と比べ侵食域からの移動距離が短いため TL・OSL 信号強度は高いが、本流の合流点から下流の TL・OSL 信号強度は合流点より上流と変わらない、または支流以上に高くなっており、支流の影響が強く見られない。これは支流でのダム建設や砂防工事により本流への供給土砂が少ないため、東から流入する支流においては測定に用いた長石の割合が本流と比べ少ないためと考えられる。また TL・OSL 信号強度は土砂移動中の露光による減少により下流ほど小さくなるはずだが、そのような結果は得られなかった。これは露光されていな

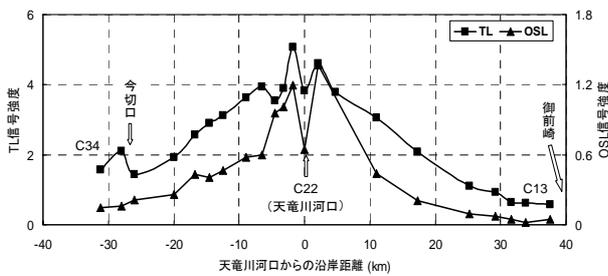


図-5 海岸線でのTL・OSL信号強度変化

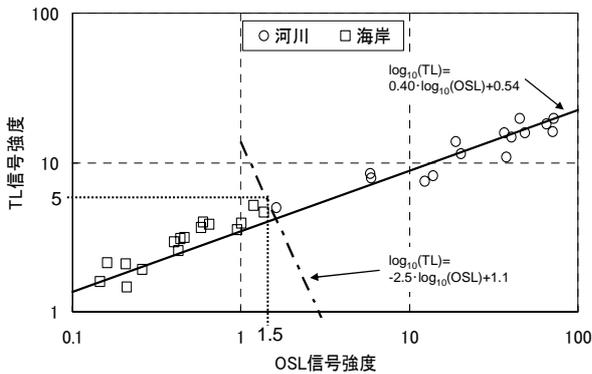


図-6 天竜川・遠州灘流砂系全体でのTL・OSL相関図

TL・OSL 信号強度の高い砂が、河床や岸壁から供給されているためと考えられ、飯田盆地の下流側、ダムの下流側において TL・OSL 信号強度の増加傾向が見られる。飯田盆地は過去に堆積している土砂が多く、その土砂が供給されているため、ダム下流では上流からの土砂供給の減少により岸壁から供給される土砂の比率が多くなるためと考えられる。

#### 4.2 遠州灘海岸

遠州灘海岸における TL・OSL 測定結果を図-5 に示す。なお TL 信号強度は小川ら(2009)の測定結果であり、その結果から天竜川の土砂供給範囲とされる地点においてのみ OSL 測定を行った。TL 信号強度と OSL 信号強度の変化は同じ傾向を示している。ただ TL 信号強度と OSL 信号強度の河口からの距離に従って減少する傾向は同じだが、減少速度は OSL 信号強度の方が速いことが分かる。これは河川域でははっきり見られなかったが、OSL の方が露光に対する感度がよいためである。

図-6 から対数をとると TL 信号強度と OSL 信号強度の相関関係は直線になることが分かった。その直線の傾きなどの数値は TL と OSL の露光に対する感度の違いを表しているといえる。この数値は流砂系の土砂移動の特性、または長石の特性により変わると考えられ、露光実験によって得られる TL・OSL 信号強度の露光時間に対する減少割合と組み合わせた分析や、他の流砂系との比較によって、流砂系固有の土砂移動特性を推定できる可能性がある。

また、天竜川の河川域と遠州灘海岸線は TL 信号強度では 5、OSL 信号強度では 1.5 を境界として分かれていることがわかる。その境界を一つの直線で表したのが図-6 の 1 点破線である。このような境

界があるのは、海岸線の砂は波による岸沖方向の移動によって露光される可能性が高く、TL・OSL 信号強度がより小さくなるためと考えられ、過去に波による移動履歴のある砂と波による移動履歴のない砂とを区別する境界となると考えられる。

#### 4.3 河口砂州

波による移動履歴のある砂と波による移動履歴のない砂とを区別する指標が得られたので、河川と海岸の双方の影響がある河口砂州において、その指標を用いて土砂移動過程の推定を行った。

##### 4.3.1 TL・OSL 信号強度による土砂移動過程の推定

河口砂州における TL 測定結果を図-7 に示す。この結果から砂州 3 と砂州コアにおいて T.P. -1m 付近に TL が 4 程度から 7-9 程度に変わる境界が見られることから、その上下で露光状態が異なる、つまり土砂移動履歴が異なることがわかる。前節で示したように、波による移動履歴のある砂とない砂との区別が TL 信号強度で 5 を境界とするので、T.P. -1m より上部は海から波で移動してきた砂であり、下部は波による移動履歴はなく川から直接運ばれた砂と考えられる。図-7 に示した河口砂州の決壊後の地表面より上部の砂の堆積過程は田島ら(2008)により波の作用によるものであると示されており、今回の結果と一致する。また砂州コアにおいては OSL 測定も行った。図-6 に砂州コアの結果を加えた図を図-8 に示す。これからも T.P. -1m に波による移動履歴のある砂とない砂との境界があることが分かる。

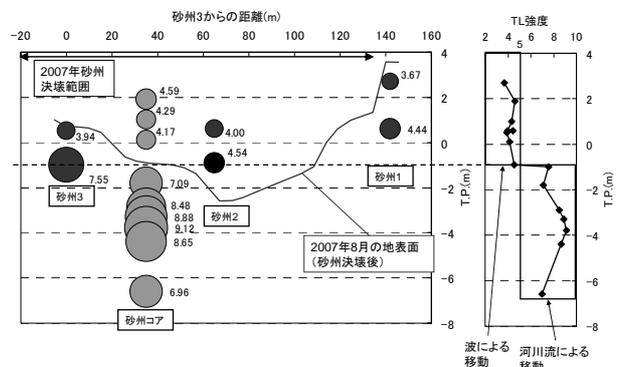


図-7 河口砂州でのTL信号強度

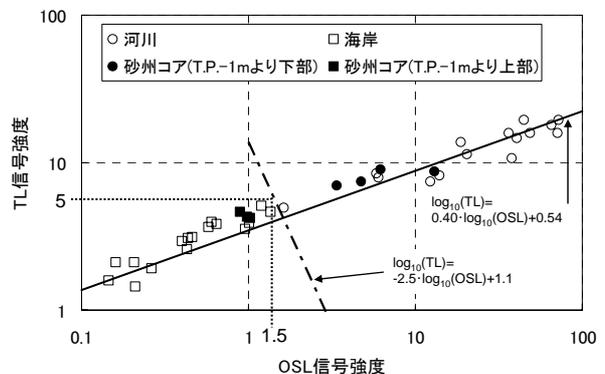


図-8 砂州コアを加えたTL・OSL相関図

砂州決壊前の砂州コアにおける境界の標高と砂州回復後の砂州 1, 2, 3 における境界の標高が同じことから、河口砂州の土砂移動過程に大きな変化はないものといえる。

また、岸本ら(2008)は中田島砂丘において TL 信号強度測定から海から運ばれた波による移動履歴のある砂と陸上で風による移動履歴のある飛砂との境界があることを示している。中田島砂丘及び今回測定した砂州コア、テラスコアの TL 信号強度を図-9 に示す。

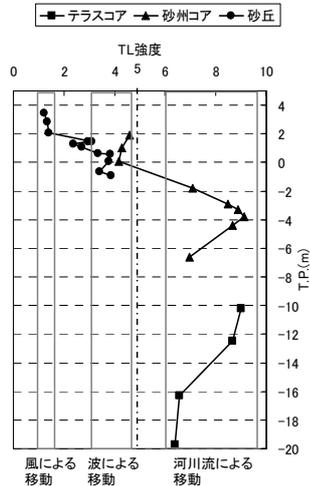


図-9 砂丘、河口砂州、河口テラスのTL信号強度

図-9 に示したように標高により土砂移動過程が異なるのが分かる。また河口砂州の表層近くにおいては、風による移動履歴のある砂丘の表層の飛砂より TL 信号強度が大きく、河口砂州の表層では風による移動履歴のある飛砂の層ができる前に海から砂が供給されていると考えられる。

#### 4.3.2 SAR 法による堆積年代の推定

河口砂州において土砂移動過程の異なる砂、それぞれの堆積年代を推定するため OSL を用いた SAR 法により年代を推定した。その際用いる年間線量は石橋ら(2009)の測定結果から 4 mGy/年とした。その結果を図-10 に示す。1ヶ所につき 12 ディスク測定し、その平均値を SAR 年代として示しているが、ディスク数が少ないため、極端に平均値から外れた値があると、その値による平均値への影響が大きすぎるため、平均値から標準偏差の 2 倍以内の値のみを用いて平均している。

2007 年に砂州が決壊した場所である砂州 2 の SAR 年代は、2007 年以降に堆積したはずなので、堆積年代は 2 年程度になるはずだが、90 年から 130 年という結果になった。これは堆積時にブリーチが完全になされず、堆積時にも OSL 信号が 0 とならずに残留してしまう、パーシャルブリーチの影響であると考えられる。また航空写真から過去には砂州が現在より前進していたため、試料採取位置は 1987 年には河道内であることが分かっており(図-11)、砂州 3 や砂州コアの T.P. -1m より下の部分程度の深さが 200 年以上前から堆積していたとは考えづらく、

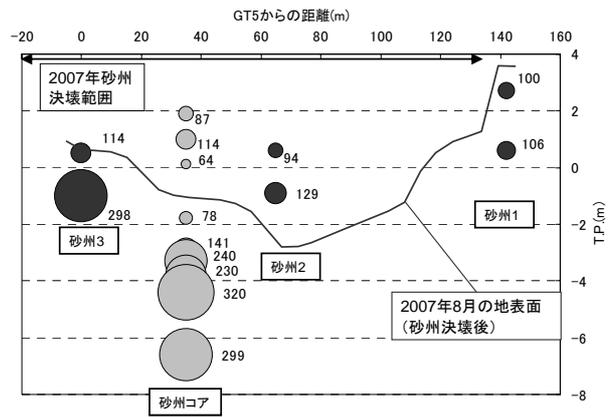


図-10 河口砂州でのSAR年代測定結果

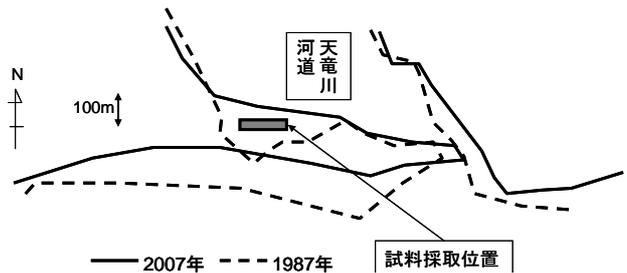


図-11 河口砂州汀線の経年変化

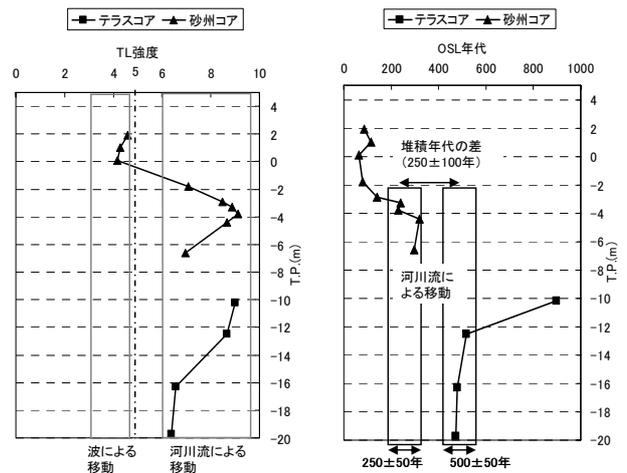


図-12 砂州コアとテラスコアのTL測定結果とSAR年代

それもパーシャルブリーチの影響であると考えられる。つまり図-10 で示された年代は堆積年代ではなく、大部分がパーシャルブリーチによって堆積時に残留していた OSL 信号の量を表しているといえる。その量は平均 SAR 年代でいうと、河口砂州 T.P. -1m より上部の海からの波による移動履歴のある砂では  $100 \pm 20$  年、河口砂州 T.P. -1m より下部の川から直接運ばれてきた砂では  $250 \pm 50$  年の範囲であることがわかった。ここで示した年代範囲は誤差範囲内に各地点の SAR 年代の値が含まれるように決定した範囲であり、以降の SAR 年代の誤差範囲も同様である。

次に河口砂州から約 600m 前面のテラスコアについても TL 測定と SAR 年代測定を行った。その結果を砂州コアとともに図-12 に示す。

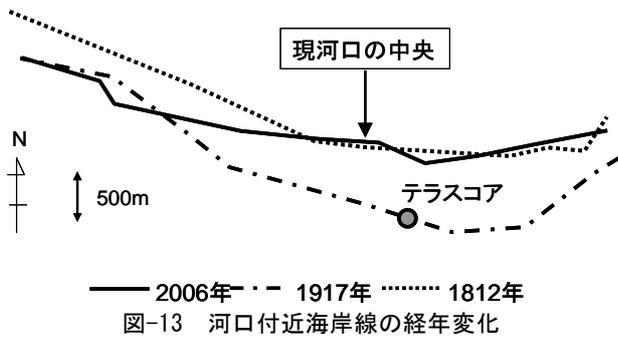


図-13 河口付近海岸線の経年変化

まず TL 信号強度を比較すると、テラスコアの値は 6-9 付近であり、砂州コアの T.P. -1m より下の砂と同程度であり、テラスコアの砂は波によって沿岸で露光されることなく、川から直接運ばれた砂だと考えられる。またテラスコアの最も上部の地点の砂の SAR 年代がそれより下部の砂の SAR 年代より大きいのは、他のより古い堆積年代の場所の砂が侵食して運ばれた砂であるためと考えられる。

ここで堆積年代において、砂州コアの T.P. -1m より下の砂とテラスコアの砂は、TL が同程度であり川から直接運ばれてきた砂あると考えられることから、パーシャルブリーチの程度はともに  $250 \pm 50$  年であると仮定すると、SAR 年代から  $250 \pm 50$  年を引くことで堆積年代が求めることができる。テラスコアの T.P. -12m より深い地点の SAR 年代は  $500 \pm 50$  年であり、パーシャルブリーチ分を引くと  $250 \pm 100$  年となる。また、航空写真と過去の地形図、伊能図の海岸線の比較から 1812 年には現在とほぼ同じで、1917 年にはテラスコアの地点には海へせり出してきていた河口砂州があり、その後河口が後退し侵食されていることがわかっており(図-13)、岸からテラスコアの地点まで河床勾配が常に一定であるとすると約 100 年で 10m 堆積という堆積速度であるため、堆積年代は 200 年から 300 年程度であると考えられ、 $250 \pm 100$  年という SAR 年代からの推定値と近い値である。

このように TL が同程度であり土砂移動過程が同様である地点はパーシャルブリーチの程度も同程度であると仮定し、SAR 年代からパーシャルブリーチの年代を引くことにより、パーシャルブリーチの影響を取り除き、推定精度を高められたといえる。

## 5. 結論

本研究では、天竜川・遠州灘流砂系において、表層と地中の砂を採取し、長石の TL 信号強度、OSL 信号強度及び SAR 法による年代測定を行い、以下の結論を得た。

(1) 天竜川において、下流側の TL、OSL 信号強度が

増加していることから、飯田盆地では堆積している古い砂が侵食され、またダム下流でも河床や岸壁の侵食が起きていることが示された。

- (2) 天竜川から遠州灘海岸までの範囲での TL、OSL 信号強度は土砂移動中に露光することで減少するが、TL、OSL 信号強度には、 $\log_{10}(\text{TL}) = 0.40\log_{10}(\text{OSL}) + 0.54$  という関係があることが分かった。
- (3) 天竜川・遠州灘流砂系において、過去に波による移動履歴のある砂と波による移動履歴のない砂を区別する指標 (TL 信号強度 5、OSL 信号強度 1.5、 $\log_{10}(\text{TL}) = -2.5\log_{10}(\text{OSL}) + 1.1$ ) が得られた。
- (4) 上記の指標から、天竜川河口砂州において、T.P. -1m 付近に、海からの波による移動履歴のある砂の層と川から直接運ばれた砂の層との境界があることが分かった。
- (5) 河口砂州での SAR 年代測定から、パーシャルブリーチの影響は川から直接運ばれた砂では SAR 年代において  $250 \pm 50$  年、波による移動履歴のある砂では  $100 \pm 20$  年と、非常に高いことが分かった。
- (6) TL が同程度であり土砂移動過程が同様である地点はパーシャルブリーチの程度も同程度であると仮定し、その地点の SAR 年代からパーシャルブリーチの年代を引くことによって、河口テラスの堆積年代は  $250 \pm 100$  年と求められた。

## 参考文献

- 1) 石橋徹・鈴木一省・劉海江・高川智博・佐藤慎司 (2009) : 長石を用いた光励起ルミネッセンス年代測定法による浜松沿岸低地の発達過程の考察, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.611-615.
- 2) 小川裕貴・劉海江・高川智博・佐藤慎司 (2009) : 長石の熱ルミネッセンス特性から推定した広域的な土砂移動特性, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.616-620.
- 3) 岸本瞬・劉海江・高川智博・白井正明・佐藤慎司 (2008) : 長石の熱ルミネッセンス特性に基づく流砂系の土砂移動の分析, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.686-690.
- 4) 田島芳満・高川智博・浅野泰史・佐藤慎司・武若聡 (2008) : 特性の異なる二つの台風による天竜川河口砂州の大規模変形, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.646-650.
- 5) Aitken, M.J. (1998): An Introduction to Optical Dating, Oxford Science Publications, pp.6-36.
- 6) Murray, A.S. and A.G. Wintle (2000): Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol, Radiation Measurement 32, pp.57-73.