

天竜川・遠州灘流砂系におけるルミネッセンス強度測定に基づく土砂移動過程の解明

Estimation of Sand Transport Processes in the Tenryu-Enshunada Watershed based on Luminescence Measurement

岸本 瞬¹・劉 海江²・高川智博³・佐藤慎司⁴

Shun KISHIMOTO, Haijiang LIU, Tomohiro TAKAGAWA and Shinji SATO

Sediment transport processes in the Tenryu-Enshunada watershed were studied in terms of feldspar luminescence properties, i.e., thermoluminescence (TL) and optically stimulated luminescence (OSL). Spatial variation of sample TL/OSL intensities indicates various sediment origins along the river route, as well as the evolution and transport process in the whole fluvial system. A relationship between TL and OSL intensities was found for all samples. Indexes were proposed for identifying the riverine and coastal sands. Underground sedimentary constitution at river-mouth sand spit and estuary terrace was specified based on these criteria. After distinguishing the effect of partial bleaching on age dating for both riverine and coastal samples, depositional age at estuary terrace was estimated.

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、河床の低下やアーマールコート化などが全国的に生じており、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土砂の流れを適正化することが必要であり、そのためには現在と過去の土砂移動過程を正しく理解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)は熱ルミネッセンス(Thermoluminescence: 以下TL)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)は光励起ルミネッセンス(Optically Stimulated Luminescence: 以下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(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信号強度(以下TL)とOSL信号強度(以下OSL)の双方の測定から天竜川河口部を中心とした流砂系の土砂移動過程の推定を行い、さらに、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、熱により励起される発光をTL、光による発光をOSLという(Aitken, 1998)。TL・OSL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、地中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で減少する。そのため土砂移動中の砂粒子のTL・OSLは累積露光時間を表す。また、露光に対する熱ルミネッセンスの反応時間が時間～日の

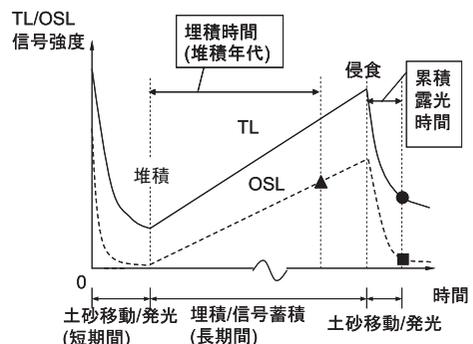


図-1 土砂移動とTL・OSL変化の概念図

- 1 学生会員 修(工) 東京大学大学院修士課程 工学系研究科 社会基盤学専攻
- 2 正会員 博(工) 東京大学特任助教 同上
- 3 正会員 博(理) 東京大学助教 同上
- 4 フェロー 工博 東京大学教授 同上

オーダーであるのに対し光励起ルミネッセンスでは秒～分である (Rink, 1999). そのためOSL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、堆積年代の推定に適している (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、2007年10月にジオスライサーを用いて採取したスラブ試料 (田島ら, 2008) と、2006年11月と2007年1月にそれぞれ掘削された河口砂州およびテラスのボーリングコア試料を分析対象とした。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。

河口砂州は、2007年7月の台風4号来週時に大きく変形し、砂州の一部が決壊するに至った (田島ら, 2008)。砂州コアと、砂州2, 3の試料はほぼ同じ地点から採取されているが、前者は砂州が決壊する以前に採取されたものであり、後者は決壊後に砂州が波浪作用により再び埋め戻された後に採取されたものである。そのため、同じ層準であっても堆積時期が異なる。

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、採取した砂試料をふるいわけ、粒径180-300 μm (TL・OSL測定用) と300-500 μm (年代測定用) の粒子を抽出した。年代測定用の粒子径が大きいのは、後に述べるエッチング処理により粒子径が減少するためである。粒子径を揃えた後、15%過酸化水素水で有機物を、18%塩酸で炭酸塩を除去し、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α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

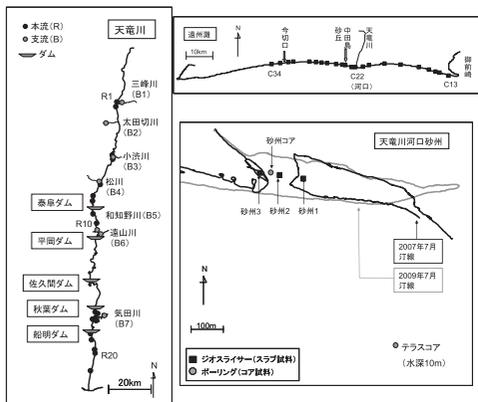


図-2 対象地域と試料採取位置

の長石粒子をステンレスディスクに単層固定し、Riso 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測定とOSL測定による年代推定を行った。

測定方法は、TLは岸本ら (2008) に準じて、平均値を取る温度範囲を260-380℃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の測定方法は岸本 (2010) に詳述した。

4. 測定結果と考察

(1) 天竜川

天竜川及びその支流のTL・OSL測定結果を図-3に示す。露光に対する感度がよいOSLは、河口を含む数か所ではほぼゼロとなっているように見えるが、後述するように、海岸を含めてこれらの箇所でもOSL強度は完全にはブリーチされていない。

図-3から、支流で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が高くなる傾向にあることが確認できるが、本川への合流点から下流のTL・OSL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る結果とはなっていない。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のが自然であると考えられ、飯田盆地より上流の区間や、秋葉ダム～船明ダム区間、船明ダムより下流の区間などで下流に行くにしたがってTL・OSLが減少する傾向が認められる。一方で、飯田盆地や泰阜ダム、秋葉ダム、船明ダムでは逆に下流でルミネッセンスが増大する傾向が見られた。飯田盆地の下流でルミネッセンスが増大するのは盆地内に堆積した古い土砂が再度侵食されて移動しているためであると考えられる。また、ダムの下流で増大するのは、流砂の

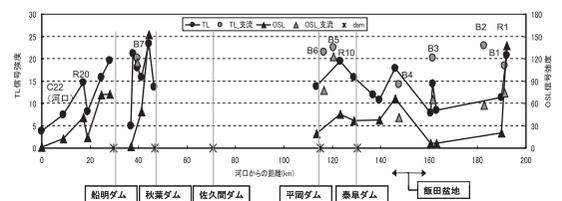


図-3 河川域でのTL・OSL変化

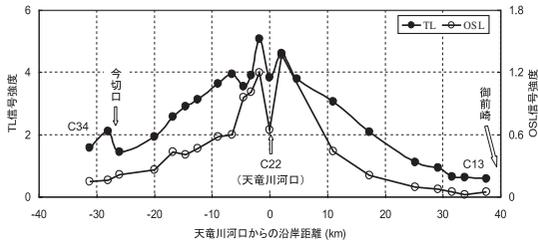


図-4 海岸での TL・OSL の変化

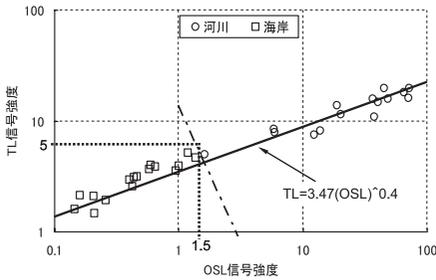


図-5 天竜川・遠州灘流砂系全体での TL・OSL 相関図

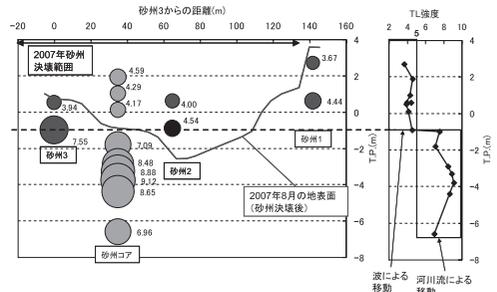


図-6 河口砂州での TL 測定結果

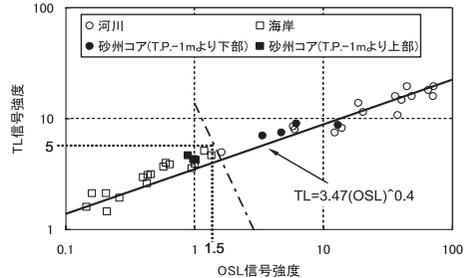


図-7 砂州コアを加えた TL・OSL 相関図

遮断により、河床や岸壁が侵食され、過去の堆積土砂や岩盤から大きなルミネッセンスを発生する粒子が供給されているためであると言える。このように河床土砂のルミネッセンスを調べることで、流砂の遮断や侵食・堆積の影響を評価できることが明らかとなった。

(2) 遠州灘海岸

遠州灘海岸における TL・OSL 測定結果を図-4 に示す。なお TL 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 と OSL の変化は同じ傾向を示している。ただ TL と OSL 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 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良いためである。

これまで得られた天竜川・遠州灘流砂系の TL・OSL の計測値を両対数グラフにプロットすると、図-5 のような直線的な関係が得られた。河川や海浜では、通常の流れや波の作用に加え、土石流や洪水流、暴浪など様々な移動過程で土砂が移動し、それぞれの移動過程で粒子が露光し、ルミネッセンスが減少する程度は異なると考えられるが、流砂系という大きなスケールで見ると OSL と TL の減少過程には密接な関係があると言える。この関係において、OSL の指数が 1 より小さいことは、OSL よりも TL の減少速度が早いことを示しており、係数が 1 より大きいことは、OSL が完全ブリーチされやすいことと対応している。これらの指数と係数といったパラメーターは流砂系全体の土砂動態における粒子の露光状態を示すものであり、露光実験によって得られる TL・OSL 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 では 5、OSL 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 1 つの直線で表したのが図-5 の一点鎖線である。このような境界があるのは、海岸の砂は波による遡上運動などで露光される機会が多く、TL・OSL 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。

(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。

a) TL・OSL 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-6 に示す。図中の円の大きさは TL 信号強度を示し、灰色の円は 2007 年の砂州決壊前に採取した試料、黒色は砂州決壊後の試料の測定結果である。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 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

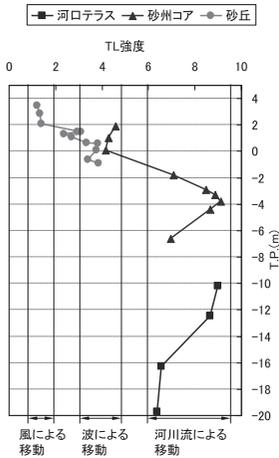


図-8 砂丘，河口砂州，河口テラスのTL測定結果

から直接運ばれた砂と考えられる．図-6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-5に砂州コアの結果を加えたものを図-7に示す．これからもT.P. -1mを境界として砂を分類できることがわかり，波による移動履歴のある砂とない砂の判別指標が河口砂州においても整合していることが確認できた．また，2007年7月の砂州決壊前に採取された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ほぼ同じであることから，砂州決壊前後で河口砂州の土砂移動過程に大きな変化はないものと推定される．また，岸本ら(2008)は中田島砂丘におけるTL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TLで判定でき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を図-8に示す．同図より，TL強度が地中の層に対応して変化していることが分かる．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が大きく，河口砂州の表層に堆積した砂は主として波浪作用によって運ばれて堆積したものであると考えられる．

b) 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をTL強度から判別できたが，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(以下SAR年代)を推定した．その際用いる年間線量は石橋ら(2009)をもとに4mGy/年とした．堆積年代の推定結果を図-9に示す．図中の円の大きさがSAR年代を示している．円の色の区別は図-6と同様である．測定点1ヶ所につき12枚のディスクを測定し，測定値の最小値を用いてSAR年代を算定した．最小値を用いたのは，パーシャルブリーチや古い地

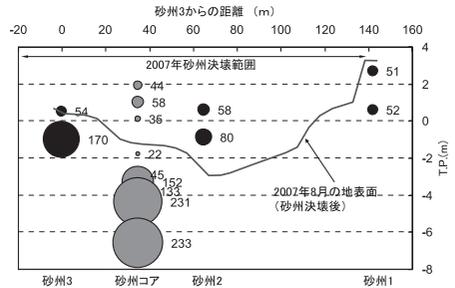


図-9 河口砂州でのSAR年代測定結果(数字は年)

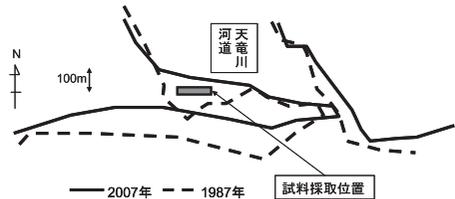


図-10 河口砂州汀線の経年変化

層との混合の影響で堆積年代が過大評価されることを避けるためである．

砂州2は2007年7月に来襲した台風4号の出水によって砂州が決壊した地点である．決壊部はその後2ヶ月程度で埋積されており，試料はこの埋積された部分から採取しているため堆積年代はおよそ2年と考えられる．しかし，測定によって得られたSAR年代は， 64.0 ± 11.4 年であった．これはパーシャルブリーチの影響であると考えられる．また，砂州全体についても，1987年撮影の航空写真では，砂州が現在より海側に位置していたため，試料採取位置は河道であった(図-10)．そのため，他の試料に関しても堆積年代は20年以内と考えられ，図-9に示したSAR年代は，それよりも有意に大きな値を示している．つまり，測定で得られるSAR年代は真の堆積年代ではなく，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成分によるものと考えられる．さらに，標高の低い位置から採取した試料，T.P.-1m以下のものは大きな年代値を示しており，波浪作用による粒子の移動履歴の有無がパーシャルブリーチの残留成分の量に影響していると言える．

堆積年代を正確に見積もるためには，パーシャルブリーチによる残留成分を適切に評価し，SAR年代を補正する必要がある．砂州コアの試料は前述のように，20年以内に堆積したもので，堆積時の残留成分に比して堆積後の蓄積成分は極めて小さいと考えられるため，砂州コアのSAR年代は残留成分の指標として用いることができる．

一方，テラスコアは比較的堆積年代が大きいと考えられ，SAR年代には堆積前の残留成分と堆積後の蓄積成分の両方の影響が含まれている．流砂系全体を対象とした

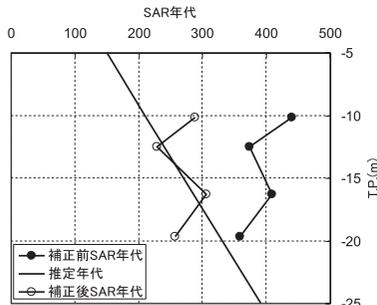


図-11 砂州コアとテラスコアの補正前後のSAR年代

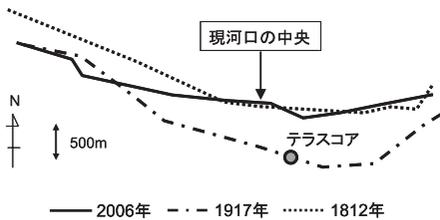


図-12 河口付近海岸線の経年変化

測定により、OSLとTLの露光による減少過程には明瞭な関係が認められたため、OSLを用いたSAR年代についてもTLとの相関関係が認められると考えられる。データにばらつきはあるものの、線形回帰分析によりTLからSAR年代に含まれる残存成分を評価し、堆積年代の補正を行った。補正前後のテラスコア試料のSAR年代を図-11に示す。図中の推定堆積年代は、1917年以前の海浜地形の経年変化(図-12)を、海底勾配一定、海岸線の前進速度一定を仮定して求めたものである。海底勾配は現在の河口部の地形を参考に1/80とし、海岸線の前進速度は1812年から1917年にかけての海岸線位置の変化から6.6m/年とした。地形データから推定したテラスコアの堆積年代とSAR年代の関係を見ると、上述の補正により、堆積年代の推定精度が大きく向上していることが確認できる。

以上により、従来困難であったブリーチが不完全な砂試料に対しても、TL分析を併用することで、残留成分を評価し、補正を行うことで、堆積年代の推定できることを示した。これは、OSLによる年代測定の適用範囲を広げる重要な成果であると言える。今後は、測定データをさらに蓄積するとともに、他の手法で年代測定を行うことができる堆積物を対象として計測を行うことで、補正方法の適用性と精度をより詳細に検証していきたい。

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、OSL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、流下方向にTL・OSLが増加することから、飯田盆地では過去に堆積した古い砂が侵食され、またダム下流では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は土砂移動中に露光することで減少するが、TL・OSLには、相関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年代およびTLの測定から、両者に一定の正の相関が認められた。この関係に基づき、テラスコアのSAR年代を補正したところ、地形データより推定した堆積年代とほぼ一致することが確認された。
- (6) TL測定を併用することにより、パーシャルブリーチの影響が大きい堆積物であっても、SAR年代を適切に補正することで堆積年代を推定可能であることを示した。

謝辞: 天竜川河口テラスのコア試料は国土交通省浜松河川国道事務所から提供いただいた。本研究は、科学技術振興調整費重要課題解決型研究「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災」および平成21年度河川整備基金助成「砂粒子のルミネッセンス計測に基づく流砂系の土砂移動の定量的推定」の研究の一部である。

参考文献

- 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.
- 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.
- 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.
- 岸本 瞬 (2010) : 長石の熱ルミネッセンス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の推定, 東京大学大学院社会基盤学専攻修士論文, pp. 65.
- 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.
- Aitken, M.J. (1998) : An Introduction to Optical Dating, Oxford Science Publications, pp. 6-36.
- 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.
- Rink, W.J. (1999) : Quartz luminescence as a light-sensitive indicator of sediment transport in coastal processes, Journal of Coastal Research, 15, pp. 148-154.