

ネパール中部小ヒマラヤ帯に発達する高位地形面に関する 光ルミネッセンス (OSL) 年代測定

下岡 順直* 八木 浩司** 長友 恒人***

キーワード：ネパール・小ヒマラヤ帯、高位地形面、形成年代、光ルミネッセンス (OSL) 年代測定、石英、海洋酸素同位体ステージ (MIS) 2

1. はじめに

ネパール中部で大ヒマラヤに横谷を形成するトリスリ (Trisuli) 川などの河川 (図1) は、山麓部海拔 500~700 m の小ヒマラヤ側で、河谷沿いに現河床から120~210 m の位置に東西幅 500~1,000 m、流路方向に数km の広がりで明瞭な平坦面を残す高位地形面 (図2のハーフトーン) が発達する (図2-1~図2-3)。それら

に合流する支流でも大ヒマラヤに最上流域をもつものは、高位地形面が上流側に連続するような分布を示し、流域全体が埋積されたかのような分布を示すことがある。これら高位地形面は、連続地表付近は赤色化を受け、日本の地形分類における海洋酸素同位体ステージ (MIS) 5e 以前に形成された高位地形面に酷似している。しかし、調査地域に関する数値年代は、中位地形面についてベリリウム10 (^{10}Be) を用いた露出年代データ (Matsushi

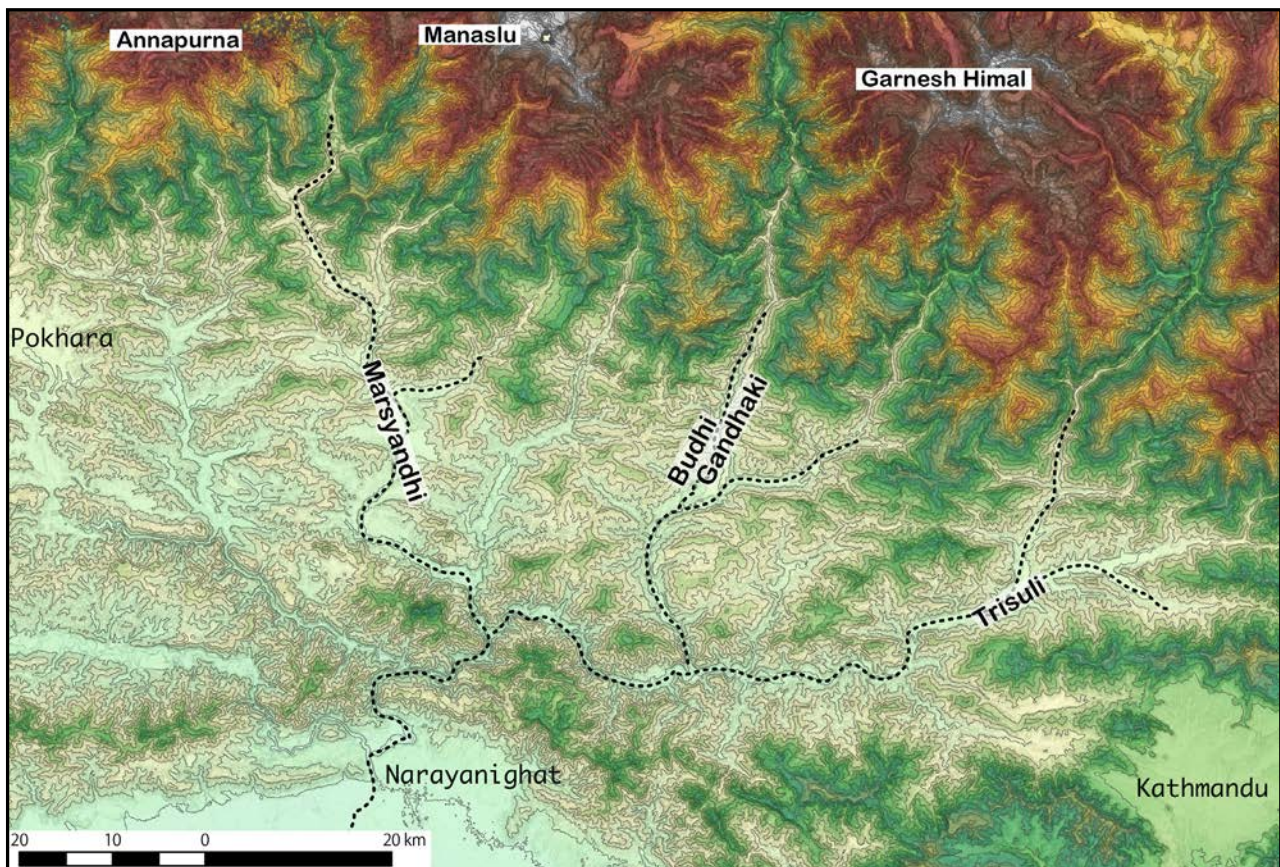


図1 調査地域とその周辺地域の地形概観

* 立正大学地球環境科学部

** (公財) 深田地質研究所・山形大学名誉教授

*** 奈良教育大学名誉教授

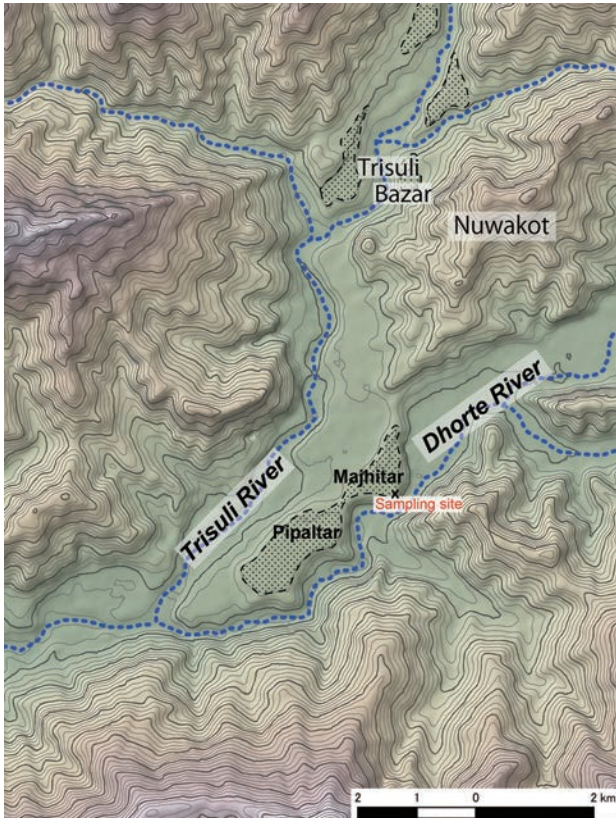


図 2-1 トリスリ川流域の高位段丘と試料採取地点 (ハーフトーンは平坦面を残す高位地形面)

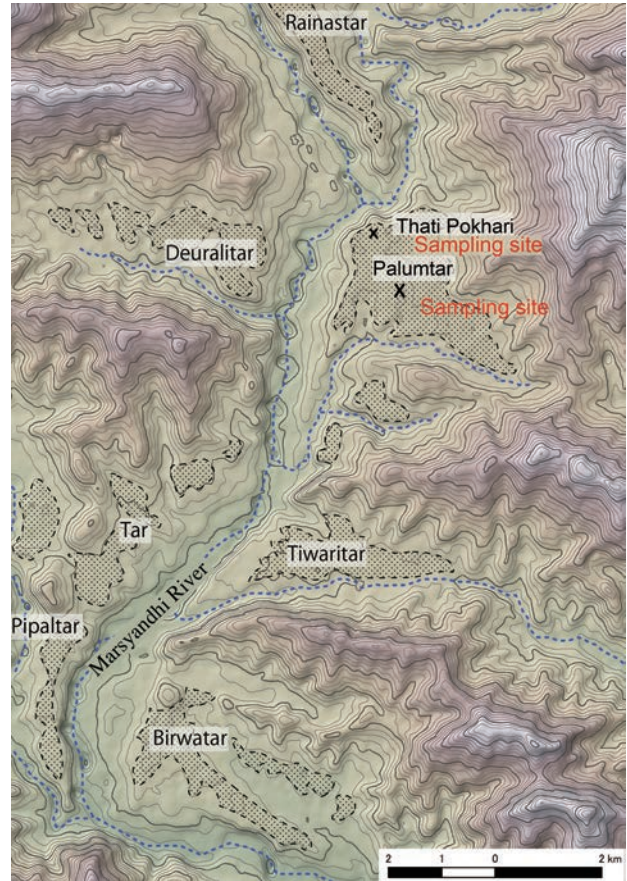


図 2-3 マルシャンディ川流域の高位段丘と試料採取地点 (ハーフトーンは平坦面を残す高位地形面)

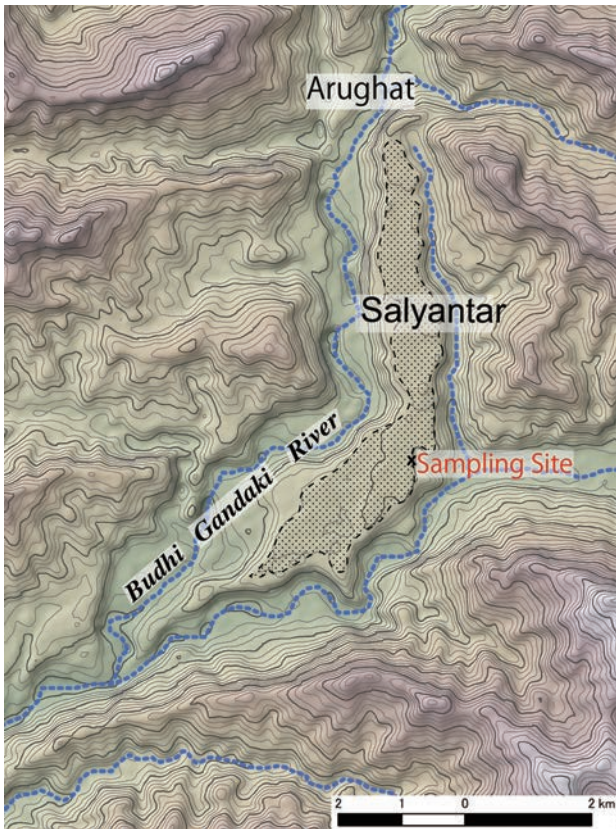


図 2-2 ブディガンダキ川流域の高位段丘と試料採取地点 (ハーフトーンは平坦面を残す高位地形面)

et al. 2017) があるものの、高位地形面に関する年代測定はこれまで行われていない。そのため、地形面の年代評価を行うことができない。

そこで、ネパール中部の小ヒマラヤを流れるトリスリ川、ブディガンダキ (Budhi Gandhaki) 川、マルシャンディ (Marsyangdi) 川の3河川流域において地形地質調査を行った。そして、前述した高位地形面を構成する層上部について光ルミネッセンス (Optically stimulated luminescence, OSL) 年代測定を実施したので報告する。

OSL年代測定 (Huntley *et al.* 1985) は、太陽光を浴びることで鉱物中のOSL信号がゼロリセット (年代の初期化) された風成・水成堆積物などに対して有効な年代測定法である。OSL年代は、イベントの発生によってゼロリセットされてから現在までに蓄積した放射線量 (蓄積線量) と、一年間に吸収する放射線量 (年間線量) を見積もり、蓄積線量を年間線量で除することで求まる。本研究ではOSL年代を求め、高位地形面の形成・離水年代の推定を試みた。

2. 試料採取および試料処理

ネパール中部小ヒマラヤ帯河谷を埋積するような高位の地形面は、段丘面頂部から谷底に達するような100 m以上の厚い砂礫質堆積物から構成される。それら堆積物はいずれも中部に厚さ50 m以上で巨礫を含む不淘汰の土石流堆積物を挟んでいる(図3)。OSL年代測定を試料は、トリスリ川、ブディガンダキ川、マルシャンディ川の3つの河川に発達する高位地形面の離水層準を示す砂質シルトを採取した。

トリスリ川では、1地点(Majhitar)の1層準から上半部と下半部で2試料(sample 1_upperとsample 1_lower)を採取した。ブディガンダキ川では、1地点(Salyantar)の1層準から1試料(sample 2)を採取した。マルシャンディ川では、2地点(Thati PokhariとPalumtar)で1層準ずつ2試料(sample 3とsample 4)を採取した。以上、合計5試料についてOSL年代測定を行った。試料は、暗幕を使って遮光した状態で、露光している露頭断面の表面を数cm程度削り落とした後、遮光できるアルミ袋に土壌を採取した。

蓄積線量は、粒径100 μm 程度の石英粒子を対象とする石英粗粒子法を用いたOSL測定で求めるため、Shitaoka *et al.* (2012) が採用した手順に準じて、試料処理を行った。はじめに、試料を水中で砕いて攪拌後、沈殿した鉱物を取り出した。取り出した鉱物試料は、10%過酸化水素水で12時間処理と、20%塩酸溶液で60分間処理後に超純水で洗浄してから乾燥させた。乾燥後、標準篩で粒度を50~250 μm に揃えた後、永久磁石で磁性鉱物を除去した。そして、残った非磁性鉱物を20%フッ化水素酸溶液で90分処理と46%フッ化水素酸溶液で10分処理を繰り返して、石英のみに純化した。最後に75~150 μm に粒度を調整した。試料が石英に純化されているかについては、石英が赤外光ルミネッセンス(IRSL)測定では発光しない特性を利用してIRSL測定を行い、IRSL信号がほぼバックグラウンドレベルであることから石英にほぼ純化されていることを確認した。処理した試料は、以下においてナチュラル試料と称する。

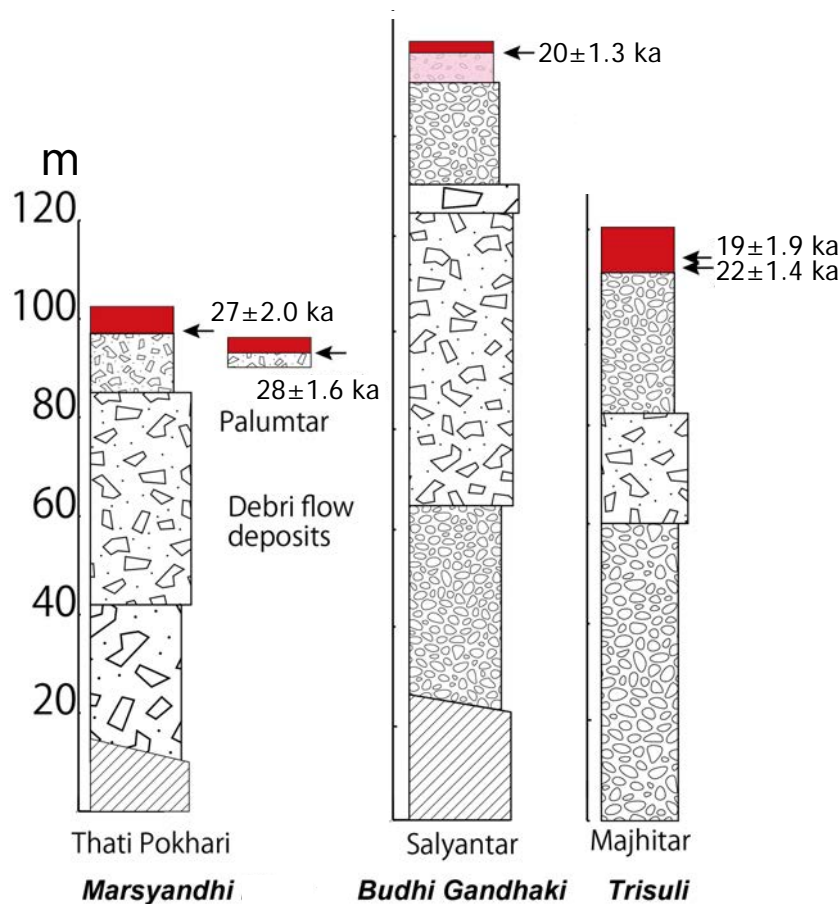


図3 ネパール・小ヒマラヤ3河川試料採取地点における柱状図とOSL年代
柱状図の斜線は基盤岩、砂礫質堆積物は土石流堆積物を挟む

表1 SAR法によるOSL測定手順

Step	Treatment	Observed
1 ^(a)	Give dose, D_i	-
2	Preheat (230°C for 60 s)	-
3	Stimulate for 100 s at 125°C	L_i
4	Give test dose, 5 Gy	-
5	Cut heat (160°C)	-
6	Stimulate for 100 s at 125°C	T_i
7	Stimulate for 40 s at 50°C	-
8	Return to 1	-

(a) Step 1: For the natural sample, $i=0$ and $D_0=0$ Gy.

3. OSL年代測定

蓄積線量評価は、Single aliquot regenerative-dose (SAR) 法 (Murray and Wintle 2000) を採用した。OSL測定には、立正大学に設置しているOSL自動測定装置NRL-99-OSTL2-KU (下岡ほか 2015) を使用した。OSL自動測定装置に装着した小型X線管球による放射線照射は、線量率 5.0 ± 1.6 Gy/分 (下岡ほか 2015) とした。SAR法によるOSL測定手順を表1に示す。SAR法によるOSL測定では、表1のように一連の再現線量測定 (L_i) と感度補正用のテストドーズ測定 (T_i) から構成され、これらから感度補正されたOSL信号 (L_i/T_i) を求めた。そして、感度補正されたOSL信号を求める測定を繰り返し、感度補正された生長曲線を求め、ナチュラル試料の感度補正されたOSL信号 (L_n/T_n) を内挿して等価線量を求めた (図4)。

OSL測定前のプレヒート温度条件は、本研究の5試料を代表させてsample 1_upperとsample 2のナチュラル試料を用いて求めた。まず、200~300°C (保持時間60秒) までプレヒート温度を20°C間隔で変化させてみかけの等価線量を求めた。そして、みかけの等価線量が安定する領域 (プラトー領域) から決定した。SAR法による繰り返し測定のためのカットヒート条件は、160°Cとした。ホットブリーチ条件は、250°Cで40秒とした。

年間線量評価は、まず、試料採取後に試料を乾燥させるとともに、含水比を計測した。その後、試料30gを秤量して所定のプラスチックケースに封入した。そして、旧キャンベラジャパン株式会社製7229P-7500S-2019ゲルマニウム半導体検出器 (下岡ほか 2018) を用いた γ 線スペクトル法 (長友 1991) でU、Th、K濃度を計測した。線量率への換算式 (Guérin *et al.* 2011) により、計測したU、Th、K濃度から年間 α 線量、年間 β 線量、年間 γ 線量を計算した。換算式を用いて計算する際、含

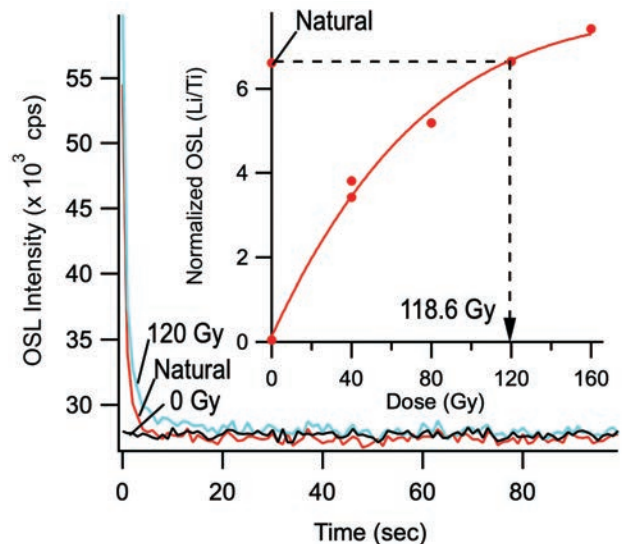


図4 ナチュラル試料および0 Gy、120 GyにおけるOSL減衰曲線と、感度補正された生長曲線

水比補正を行った。なお、蓄積線量評価に粒径75~150 μ m程度の石英を用いたので、年間線量評価は、年間 β 線量、年間 γ 線量および年間宇宙線量の和で求めた。ナチュラル試料はフッ化水素酸溶液処理により、石英の表面をエッチングしたため、 α 線に起因するルミネッセンスは含まれない。そのため、今回の年間線量評価には年間 α 線量は含まない。年間宇宙線量は、採取した試料が表層に近いことから、0.15 mGy/年とした。

4. 結果と考察

プレヒート温度条件については、sample 1_upperでは220°Cにおけるみかけの等価線量がやや高いものの200~260°Cにかけて、sample 2では200~240°Cにかけて、みかけの等価線量がほぼ一定となるプラトー領域になった (図5)。これらの結果を基に、本研究におけるOSL測定のプレヒート温度条件は、230°Cを採用した。

次に、Dose recovery test ($n=4\sim 5$) を行い、SAR法の測定条件が試料に適合しているか判定した。まず、試料のOSL信号を人為的にゼロリセット後に人工照射した60 Gyに対し、プレヒート条件230°Cを用いたOSL測定で再現した等価線量との比 (線量比) を求めた。その結果、線量比はsample 1_upperでは 1.02 ± 0.12 、sample 2では 0.74 ± 0.07 であった。Wintle and Murray (2006) の判定基準を基にすると、線量比が0.9~1.1以内の場合、決定した測定条件は適合していると判断する。sample 1の線量比はこの判断基準に適合するが、sample 2の線量比は判定基準よりやや低いので、線量評価が過小評価に

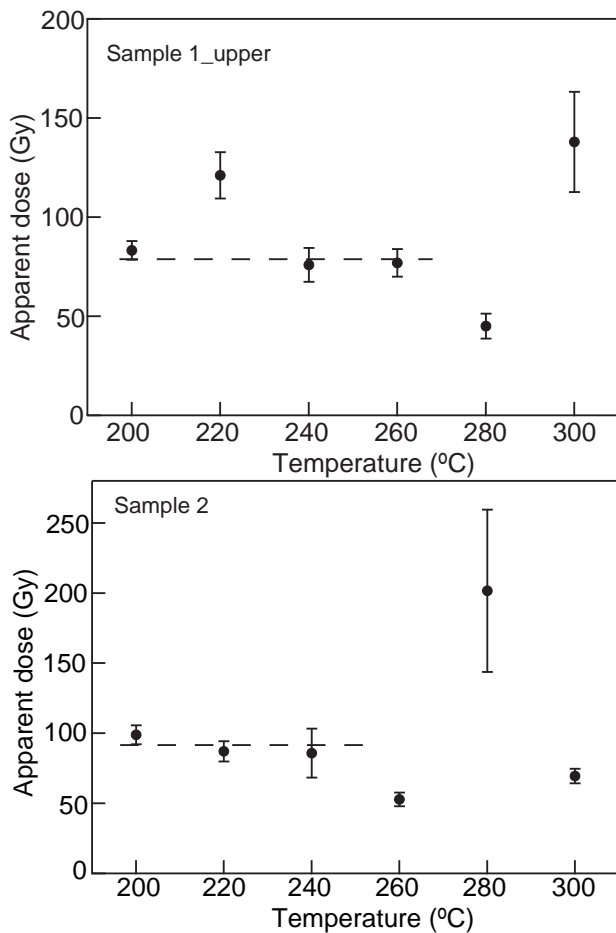


図5 プレヒート温度ごとの見かけの等価線量とプラトー領域（点線）

なる可能性がある。今回は、sample 1の結果を基に、測定条件を決定した。

この測定条件を用い、SAR法によるOSL測定を複数回 ($n = 27 \sim 36$) 行った。そして、等価線量の分布をRadial plots (Vermeesch 2009) で表示した (図6)。蓄積線量は、等価線量の分布よりCentral age model (Galbraith *et al.* 1999) を採用して評価した (表2)。なお、等価線量の過分散 (overdispersion: σ_{OD}) は、5試料で11~26%であった。Olley *et al.* (2004) では、蓄積線量の過分散が20%以下の場合、光によるゼロリセットが十分なされているとしている。sample 1_upperは蓄積線量の過分散が26%であるため、光によるゼロリセットが不十分である可能性がある。また、sample 2は蓄積線量の過分散が20%と判定ライン上にあるため、こちらも完全にゼロリセットされていない可能性はある。その他の試料については、光によるゼロリセットは十分と判断した。

年間線量は、 γ 線スペクトル法で計算したU、Th、K濃度から含水比補正した線量率に換算して評価した。その結果を表2に示す。

以上の結果から、蓄積線量を年間線量で除することでOSL年代を求めた。トリスリ川で採取した試料では、1地点の1層準から上半部 (sample 1_upper) と下半部 (sample 1_lower) でそれぞれ19 kaと22 kaとなった。上半部のsample 1_upperについては、過分散が20%以上であることからOSL信号が完全にゼロリセットされていない可能性はあるものの、sample 1_lowerのOSL年代と比較すると層序的には矛盾しない結果であった。このことから、sample 1_upperの年代が19 kaよりも若く見積られる可能性はあるものの、年代推定できていると考える。

ブディガンダキ川から採取したsample 2のOSL年代は、20 kaであった。この試料の蓄積線量の過分散は20%と判定ライン上にあるものの、他試料の結果と比較して堆積年代の推定はできていると考える。

マルシャンディ川から採取したsample 3は27回の複数回測定のうち、等価線量を評価できた測定は5回であった。ナチュラル試料の感度補正されたOSL信号のほとんどが、感度補正された生長曲線のOSL強度を超えてしまったことが原因である。つまり、sample 3の蓄積線量の過分散は20%を下回っているが、実際には等価線量が160 Gyより大きいものが多いことから、試料としては光によるゼロリセットが部分的な可能性が高い。ただし、マルシャンディ川から採取した2試料 (sample 3とsample 4) については、それぞれ27 kaと28 kaと得られており両者はよく一致した。このことから、堆積年代の推定ができていると考える。

以上より、調査地域の高位地形面に関するOSL年代は、約19~28 kaとなった。OSL年代が約19~28 kaの間に収まったことから、3つの河川に発達する高位地形面の離水層準はMIS 2におけるイベントであると推定される。マルシャンディ川沿いの中位地形面については、Matsushi *et al.* (2017) が加速器質量分析計を用いた石英中の宇宙線起源のベリリウム10 (^{10}Be) による露出年代を測定し、3.6~4.1 kaを報告している。今回の高位地形面のOSL年代はこれと矛盾しない。このことから、高位地形面の形成・離水年代は、最終氷期にあたる20~30 ka頃と考えられる。この年代は、MIS 2に相当する。

今後は、OSL年代の地形学的な解釈を含め、高位地形面の年代から河川の下刻速度を求め、さらに下位地形面の年代とあわせて、調査地域における地形形成プロセスの解明を目指したい。

表2 OSL測定結果

Sample No.	n^a	Paleodose ^b (Gy)	σ_{OD}^c (%)	U (ppm)	Th (ppm)	K (wt%)	Water content (%)	Annual dose ^d (mGy/a)	OSL age (ka)
1 upper	Tr.R. 10/27	93.8 ± 8.7	26	5.84 ± 0.12	23.07 ± 0.61	2.04 ± 0.08	10	4.90 ± 0.22	19 ± 1.9
1 lower	Tr.R. 10/36	109.9 ± 5.2	11	7.05 ± 0.12	23.74 ± 0.61	1.99 ± 0.08	15	4.93 ± 0.23	22 ± 1.4
2	Bd.R. 16/27	91.9 ± 5.1	20	5.05 ± 0.12	24.41 ± 0.61	2.35 ± 0.08	18	4.69 ± 0.15	20 ± 1.3
3	Mr.R. 5/27	110.6 ± 9.2	14	5.22 ± 0.12	24.88 ± 0.61	2.06 ± 0.08	30	4.04 ± 0.10	27 ± 2.0
4	Mr.R. 16/27	115.8 ± 4.7	12	4.51 ± 0.12	24.75 ± 0.61	1.76 ± 0.08	19	4.08 ± 0.16	28 ± 1.6

a: number of aliquots, accepted / measured, b: CAM - Central Age Model, c: overdispersion value, d: for coarse grains method

Tr.R.: Trisuli River, Bd.R.: Budhi Gandhaki River, Mr.R.: Marsyandhi River

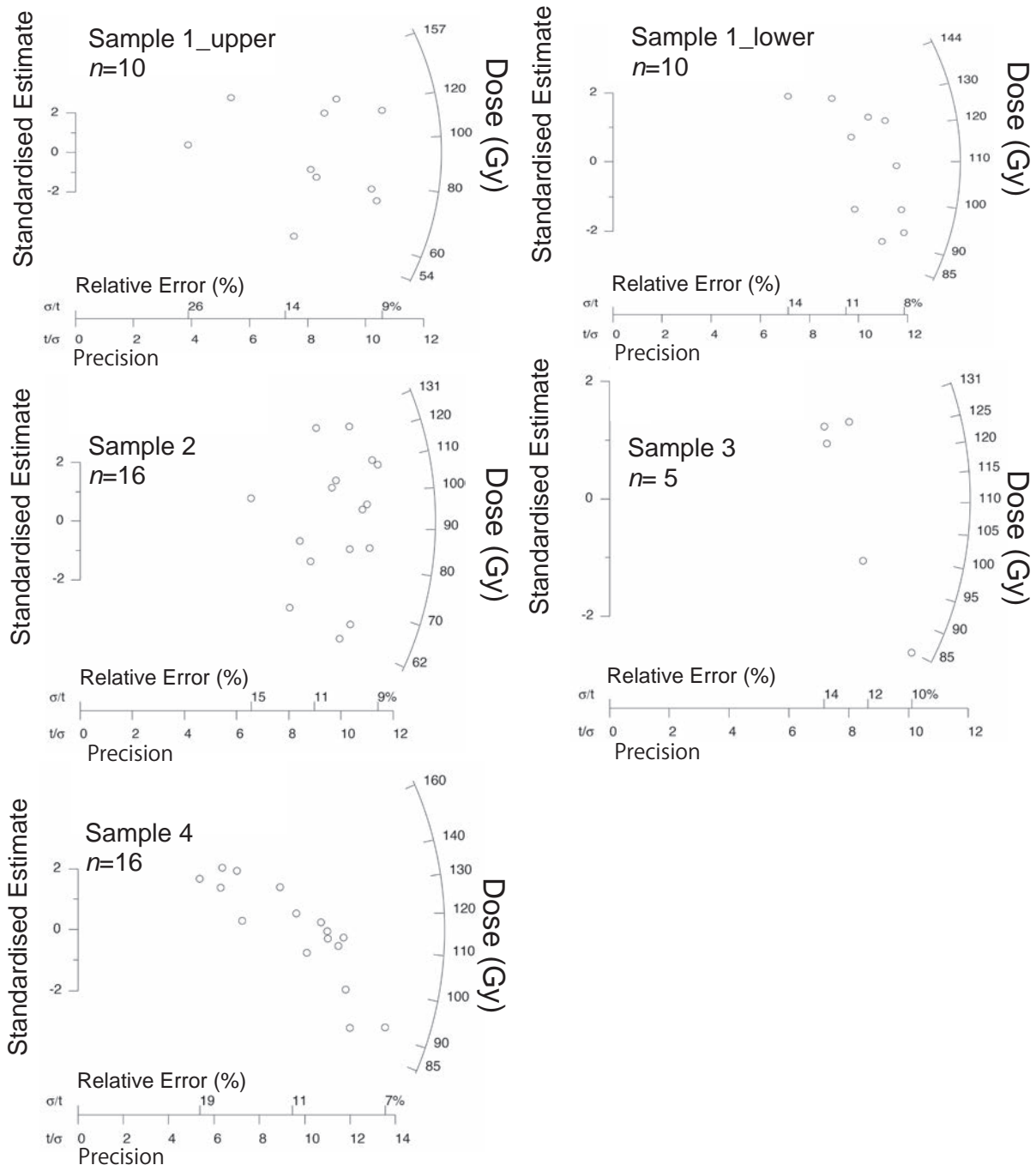


図6 Radial plots (Vermeesch 2009) による各試料の等価線量分布

謝辞

本稿は、日本地理学会2019年春季学術大会（八木ほか2019）および16th LED conference (Shitaoka *et al.* 2021) で発表した内容の一部を加筆修正したものである。本測定には、日本学術振興会科研費基盤研究 (B) 19H01368の一部を使用した。また、匿名査読者からのコメントにより、本稿は改善された。記して感謝申し上げます。

引用文献

- Galbraith, R.F., Roberts, R.G., Laslett, G.M., Yoshida, H. and Olley, J.M. (1999) Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: part 1, experimental design and statistical models. *Archaeometry*, 41, 339-364.
- Guérin, G., Mercier, N. and Adamiec, G. (2011) Dose-rate conversion factors: update. *Geochronometria*, 29, 5-8.
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I. and Thewalt, M.L.W. (1985) Optical dating of sediments. *Nature*, 313, 105-107.
- Matsushi, Y., Yagi, H. and Matsuzaki, H. (2017) Dating a large scale debris flow event using terrestrial cosmogenic nuclide: an attempt in Marshyangdi River, central Nepal. *Journal of Nepal Geological Society*, 54, 105.
- 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 (1991) TLおよびESR年代測定のための年間線量率の測定. *月刊地球*, 13-4, 249-253.
- Olley, J.M., De Deckker, P., Roberts, R.G., Fifield, L.K., Yoshida, H. and Hancock, G. (2004) Optical dating of deep-sea sediments using single grains of quartz: a comparison with radiocarbon. *Sedimentary Geology*, 169, 175-189.
- 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・波多野智・田邊和明・森美比古・青木智史・阪江修 (2015) OSL/TL自動測定装置NRL-99-OSTL2-KUの設計製作とX線管球の線量率較正. *地球環境研究*, 17, 107-110.
- 下岡順直・清水隆一・北沢俊幸・川野良信 (2018) ゲルマニウム半導体検出器を用いたγ線スペクトロメトリーのシステム構築. *地球環境研究*, 20, 179-183.
- Shitaoka, Y., Yagi, H., Nagatomo, T. and Matsushi, Y. (2021) Quartz OSL dating to find formative ages of Higher terraces burring valleys in the central Lesser Nepal Himalayas. 16th International Luminescence and Electron Spin Resonance Dating Conference (LED2021 online meeting), 223.
- Vermeesch, P. (2009) RadialPlotter: A Java application for fission track, luminescence and other radial plots. *Radiation Measurements*, 44, 409-410.
- 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.
- 八木浩司・下岡順直・長友恒人・松四雄騎・檜垣大助 (2019) ネパール中部・小ヒマラヤ帯の河谷を埋積するように発達する高位段丘とその形成年代. *日本地理学会発表要旨集 (2019年春季学術大会)*, 95, 133.

OSL dating relevant to formative ages of Higher terraces burring valleys in the central Lesser Nepal Himalayas

SHITAOKA Yorinao*, YAGI Hiroshi**, NAGATOMO Tsuneto***

* Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

** Fukada Geological Institute, Emeritus professor of Yamagata University

*** Emeritus professor of Nara University of Education

Abstract :

In the foothills of the Lesser Himalayan side at 500-700 m above sea level, with rivers that form lateral valleys in the Greater Himalayas of central Nepal, a high terrace surface has developed along the river valley at 120-210 m above the present river bed. The bed has an east-west width of 500-1,000 m and a channel direction of several kilometers, leaving a clear flat surface. These high terrace surfaces, which are reddened near the continuous ground surface, closely resemble high terrace surfaces formed before Marine Oxygen Isotope Stage (MIS) 5e in the Japanese landform classification. However, in this study area, no dating of the higher terrace surfaces has been conducted yet.

We conducted geomorphological and geological surveys of three river basins in the Lesser Himalayas of central Nepal: Trisuli, Budhi Gandhaki, and Marsyandhi. Additionally, we conducted Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating of the upper part of the high terrace surfaces described above.

Five samples were collected from sandy silt relevant to the high terrace surfaces in three rivers for OSL dating. Quartz of ca. 75-150 μm diameter was separated from all samples. Quartz OSL measurements were taken using an OSL/TL reader (NRL-99-OSTL2-KU; Neoark Corp.). Irradiation was done using a small X-ray tube (dose rate 0.16 Gy/s) built into the OSL reader. Dose-response curves for paleodose estimation were constructed using the single aliquot regenerative dose (SAR) procedure. Annual doses were measured using a gamma-ray spectrometer. All OSL ages were ca. 19-28 ka. Results show that the formative ages of these high terrace surfaces were in MIS 2.

Key words : lesser Nepal Himalayas, higher terraces, formative ages, optically stimulated luminescence (OSL) dating, quartz, marine oxygen isotope stage (MIS) 2