

拠点研究(一般推進)2021A-04 報告書

宇宙線生成核種の深度プロファイリングによる変動地形の形成年代決定法の確立と
適用

Depth profiling of terrestrial cosmogenic nuclides for dating tectonic landforms

研究代表者: 京都大学防災研究所 地盤災害研究部門
松四雄騎

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
Yuki Matsushi

2022年5月

May 2022

概要

本研究では、地表近傍の造岩鉱物中に生成・蓄積する宇宙線由来の同位体（地上宇宙線生成核種：TCN: terrestrial cosmogenic nuclides）を用いて、地形の形成年代を決定する手法を確立し、それを変動地形の発達史復元に適用して、活断層の長期的な変位速度の評価に応用することを目的とする。確度の高い地形形成年代値を得るため、TCN深度プロファイリングと呼ばれるアプローチを採用し、新しい核種蓄積の数理モデルを構築するとともに、それを現実の地形に応用して方法の適用性を精緻に検討する。

研究対象として、活動度が高いと推定される一方で、その確実な評価が未だ定まっていない濃尾断層帯の北方域を選定し、根尾谷断層および温見断層によって切断された河成段丘を手法適用の対象に選定した。まず、航空レーザー測量に基づく細密地形情報を参照しながら地形の形成過程を定性的に復元したうえで、段丘面において試孔を掘削し、複数深度で段丘堆積物を採取して、石英中のTCNである ^{10}Be を加速器質量分析により測定した。次に、得られたTCN深度プロファイルに対し、モデルカーブをフィッティングさせることで、段丘面の離水後の風成物による埋積および離水前の土砂の生産輸送履歴を反映した継承核種量を考慮した、高確度・高精度の段丘離水絶対年代を得た。

分析の結果、段丘堆積物中の石英に含まれる ^{10}Be の濃度は、深度方向に指数関数的に減衰し、ゼロに漸近するプロファイルを示すことが明らかとなった。このことは、堆積物の定置時点での継承核種量がおおむね無視できる程度であったことを示唆する。解析の結果、対象とした河成段丘は、最終氷期最盛期に離水したことが明らかとなった。段急崖と段丘面の変位量に基づき、断層の活動度を定量的に評価したところ、従来よりも有意に確度の高い横ずれ変位速度を決定することができた。本プロジェクトにより、変動地形学におけるTCNの有用性が示され、さらに大型のプロジェクト立案と研究費獲得へとつながった。宇宙線生成核種の生成率算出やモデル解析の補助として参加した大学院生に対する教育的波及効果も大いに得られた。

目次

概要	1
1. 研究の背景と目的	3
2. 研究計画・方法	3
3. 結果および解析	6
4. まとめ	6
引用文献	7

1. 研究の背景と目的

テクトニックな地盤の変位・変形によって生じる地形は変動地形と呼ばれ、地域的なテクトニクスの理解や、地震の発生を伴う過去の断層活動の復元において重要な手掛かりとなる。変動地形の形成年代は、地形の解析と組み合わせることで、その場の隆起量や断層の正味の変位速度などを推定するのに役立つ。近年、航空レーザー測量などの技術的進展により、地形が高解像度で把握できるようになった一方、その形成絶対年代を知ることは従来困難な場合が多く、確度・精度の高い、地形の年代決定法が必要とされている。

一般に、地形を構成する地表近傍の岩盤や堆積物中の造岩鉱物中に生成・蓄積する宇宙線由来の同位体(地上宇宙線生成核種: TCN: terrestrial cosmogenic nuclides)を、加速器質量分析によって測定することで、地表面の露出年代を知ることができる。しかし、多くの場合、年代測定の対象となる地形は現成のものではなく、その形成をもたらした作用から解放され、過去に主として働いていたものとは別の営力によって新たに削剥あるいは埋積される状態へと移行しつつある。このとき、この手法により、元の地形が形成完了されたタイミングをあらわす真の年代値を高確度で推定するには、地形形成以降の地表面の削剥速度や埋積速度を考慮した補正が必要である。また、分析に供する鉱物粒子が、対象とする地形を構成する以前に経てきた履歴を反映して、無視できない量のTCNの持ち込み(継承核種: inheritance)を有している場合には、それに対する見積もりと差し引きも必要となる。

本研究では、TCNを用いて、地形の形成年代を決定する手法を確立し、それを変動地形の発達史復元に適用して、活断層の長期的な変位速度の評価に応用することを目的とする。このとき、不確かさをもたらす要因を定量的に評価して、確度の高い地形形成年代値を得るためのTCN深度プロファイリングと呼ばれるアプローチを採用し、新しい核種蓄積の数理モデルを構築するとともに、それを現実の地形に応用して方法の適用性を精緻に検討する。

この研究は、活断層の長期評価において、極めて実効的な新手法を開拓・提案するものである。これにより、従来その評価の難しかった断層セグメントの活動ポテンシャルを定量的に把握し、地震ハザードの評価に資する情報を提供することができるようになる。また、この課題は、専門分野の異なる参画者の知見と、防災研究所および東京大学固有の実験設備を援用して初めて実行可能になる、学際的かつ独創的な研究である。

2. 研究計画・方法

本研究では、変位速度の決定が相対的に困難な横ずれ断層に焦点を当て、断層によって切断された河成段丘を手法適用の対象とする(図1)。まず、航空レーザー測量に基づく細密地形情報を参照しながら段丘面の区分を行って地形の形成過程を定性的に復元したうえで、段丘面において試孔を掘削し、複数深度で段丘堆積物を採取して、石英中のTCNである ^{10}Be を加速器質量分析によって測定する。次に、得られたTCN深度プロファイルに対し、モデルカーブをフィッティングさせることで、段丘面の離水後の削剥や風成物による埋積および離水前の土砂の生産輸送履歴を反映した継承核種量を考慮した、高確度の段丘離水絶対年代を得る。そして、段急崖や段丘面の変位量に基づき、断層の活動度を定量的に評価する(図1)。

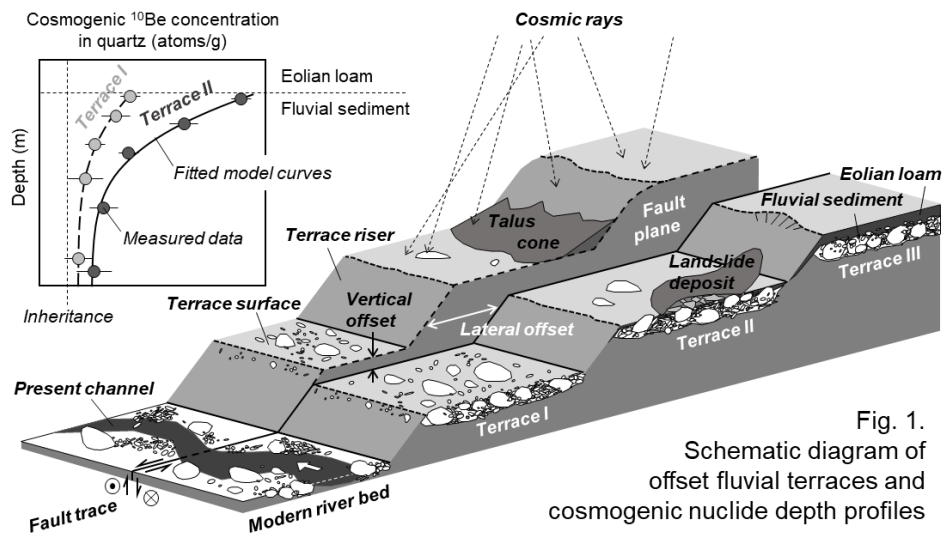


図1 横ずれ断層による河成段丘の変位と宇宙線生成核種の蓄積の概念図

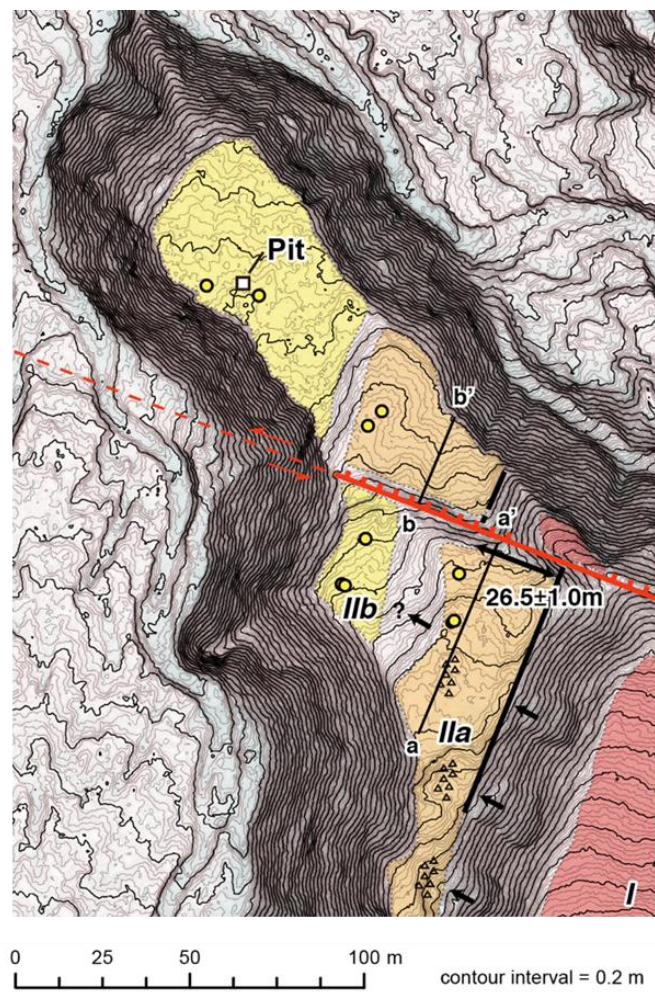


図2 調査対象場の地形学図

本研究では、活動度が高いと推定される一方で、その確実な評価が未だ定まっていない濃尾断層帯の北方域を選定し、温見断層によって変位を受けた河成段丘を選定した(図2)。段丘面は現河床からの高度が異なる2つないし3つの面群に区分される。中位面の段丘崖の水平変位量は約26 m、段丘面の鉛直変位量(図2a-a'およびb-b'測線での推定)は約6 mとなっている。もっとも広い段丘面上でピットを掘削し、深度方向に段丘堆積物のマトリックス部を分析対象として複数採取した(図2, 3)。

試料はミルおよび篩を用いて粉碎・整粒し、0.25~1 mmのフラクションを以降の処理に供した。ネオジム磁石による磁性分離、ポリタングステン酸ナトリウム(SPT)溶液による重液分離(檀原・他, 1992)、および高温・長時間のHCl処理およびHF・HNO₃混酸処理(Kohl and Nishiizumi, 1992)によって清浄な石英粒子のみを抽出した。抽出された清浄な石英を、Be濃度既知のBe担体(キャリア)添加後に溶解し、陰イオン交換、陽イオン交換、およびBe(OH)₂沈殿精製によってBeを単離した。また、作業工程におけるバックグラウンド評価のため、Be担体のみの試料についても同様の処理を行った。最後に、炉で焼成してBe₀の形にし、ニオブ粉末ともにカソードホルダーにプレスした。試料の¹⁰Be/⁹Be同位体比は、東京大学総合研究博物館タンデム加速器研究施設の加速器質量分析システム(Matsuzaki *et al.*, 2007)を用いて測定した。測定された各試料の¹⁰Be/⁹Be同位対比、溶解石英量、添加Be担体量、Be担体のBe濃度を基に、各試料の単位石英重量あたりの¹⁰Be濃度(atoms/g)を決定した。

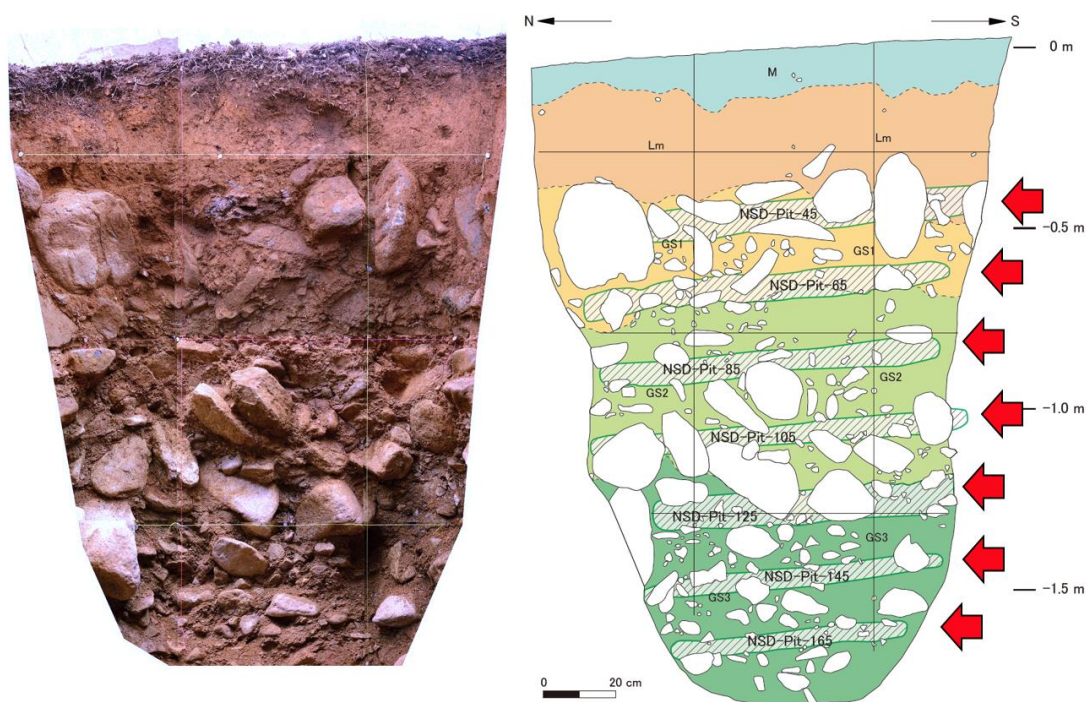


図3 ピット壁面の記載と堆積物試料の採取位置(グリッド間隔は50 cm)。

3. 結果および解析

核種濃度分析の結果、段丘堆積物中の石英に含まれる ^{10}Be の濃度は、深度方向に指数関数的に減衰し、ゼロに漸近するプロファイルを示すことが明らかとなった。このことは、堆積物の定置時点での継承核種量がおおむね無視できる程度であったことを示唆する。段丘面上は厚みが50 cm以下程度の風成物に覆われており、年代決定にはこの被覆物の影響を考慮する必要がある。そこで、以下の様なモデリングを行った。

地形面が形成された(離水した)後、一定速度で堆積物に被覆された場合、元の地形表面を零点にとった深度 $x_0(\text{m})$ における核種濃度 $C(\text{atoms/g})$ の時間変化は、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = P_0 \sum P_i e^{-\frac{\rho_b x_0 + St}{\Lambda_i}} - C\lambda \quad (1)$$

で表される(松四, 印刷中)。ここで、 P_0 はこの地点における核種生成率(atoms/g/yr)、 ρ_b は地形構成物質の密度(g/m^3)、 S は被覆堆積物の重量堆積速度($\text{g/m}^2/\text{yr}$)、 P_i および Λ_i は複数の核種生成過程それぞれの寄与率および生成率減衰長(g/m^2)、 λ は核種の壊変定数($1/\text{yr}$)である。堆積速度が時間的に変化しないと仮定すると、式(1)の解析解は、

$$C = C_0 e^{-\lambda t} + P_0 \sum P_i e^{-\frac{\rho_b x_0}{\Lambda_i}} \left[\frac{e^{-St/\Lambda_i} - e^{-\lambda t}}{\lambda - S/\Lambda_i} \right] \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 C_0 は継承核種濃度(atoms/g)である。 $t(\text{yr})$ 経過後の被覆堆積物の厚さが $H(\text{m})$ であるとき、被覆堆積物の重量堆積速度 S は、被覆堆積物の密度 $\rho_s(\text{g/m}^3)$ を用いて

$$S = \rho_s \frac{H}{t} \quad (3)$$

と表すことができるので、(2)(3)式を用いることにより、深度 $x_0(\text{m})$ における核種濃度 C は、継承核種濃度 C_0 と経過時間 t の2つの未知数の関数で表されることになる。

このモデルをデータにフィッティングさせ、地形の露出年代値を求めたところ、この段丘面は最終氷期最盛期に離水したことが明らかとなった。段急崖と段丘面の変位量に基づき、断層の活動度を定量的に評価したところ、従来よりも有意に確度の高い横ずれ変位速度を決定することができた。

4. まとめ

地表近傍の造岩鉱物中に生成・蓄積している宇宙線生成核種の濃度を加速器質量分析によって測定し、地形の形成年代を精緻に決定するための深度プロファイリング法を確立することができた。それを濃尾断層帯北方の断層運動によって変位を受けた河成段丘の発達史復元に適用して、活断層の長期的な変位速度の評価に応用した。段丘面の離水年代を決定し、段急崖と段丘面の変位量に基づき、断層の活動度を定量的に評価したところ、従来よりも有意に確度の高い横ずれ変位速度を決定することができた。本プロジェクトにより、変動地形学におけるTCNの有用性が改めて示されたといえる。

引用文献

- 檀原 徹・岩野英樹・糟谷正雄・山下 徹・角井朝昭, 無毒な重液SPT(ポリタングステン酸ナトリウム)とその利用, 地質ニュース, 455, 31–36, 1992.
- Dunne, J., D. Elmore, and P. Muzikar, Scaling factors for the rates of production of cosmogenic nuclides for geometric shielding and attenuation at depth on sloped surfaces, *Geomorphology*, 27, 3-12, 1999.
- Kohl, C.P. and K. Nishiizumi, Chemical isolation of quartz for measurement of in-situ-produced cosmogenic nuclides, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 3583–3587, 1992.
- 松四雄騎, 鉱物中に生成する宇宙線生成核種を用いた地形形成年代の決定, *RADIOISOTOPES*, 印刷中.
- Matsuzaki, H., C. Nakano, Y.S. Tsuchiya, K. Kato, Y. Maejima, Y. Miyairi, S. Wakasa, and T. Aze, Multi-nuclide AMS performances at MALT, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 259, 36–40, 2007.