

¹⁰Be 年代測定を用いた断層活動性評価手法の高精度化に関する研究

2023 年度

松四 雄騎*

1. 研究の目的

本研究では、地表近傍の岩石に含まれる石英中に生成・蓄積している宇宙線由来の同位体（宇宙線生成核種）である ¹⁰Be を用いて断層の活動性を評価する手法の高精度化を試みる。前年度までに、試料の採取・前処理・分析における不確かさを軽減し、データの精度向上に関する検討を行った。また、地中での宇宙線生成核種の蓄積モデリングの高度化のひとつとして、河成段丘のように、地形形成（離水）後、地表が埋積を受けるようなケースについて検討し、核種の蓄積計算に基づいて地表面下における核種濃度の深度プロファイルを描くことのできるモデルを構築する試みを行った。本年度は、上下変位を伴うことで周囲の地形変化をもたらす断層の運動が、削剥速度の空間変化を通じて、どのように核種濃度分布に影響するかについてのシミュレーションを行い、手法の有用性についての定量的な検証を実施した。

2. 研究の方法

地表付近における宇宙線生成核種 ¹⁰Be の蓄積については、標準的モデルに従って計算を行った。削剥を受ける地表における鉱物中での核種の蓄積は、次のように表すことができる。

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

ここで、 C は核種濃度 (atoms g⁻¹)、 t は時間 (yr)、 P_0 は地表での単位鉱物あたりの年間核種生成率 (atoms g⁻¹ yr⁻¹)、 x は任意時点の地表を零点にとった深さ (m)、 D は地表面の削剥速度 (g m⁻² yr⁻¹)、 ρ_b は地形を構成する物質の密度 (g m⁻³)、 P_i は核種を生成させる中性子核破碎、負ミューオン捕獲、高速ミューオン相互作用それぞれの寄与率、 Λ_i は各々の核種生成過程に関与する粒子の減衰長 (g m⁻²)、 λ は核種の壊変定数 (yr⁻¹) である。式(1)の解は、

$$C = C_0 e^{-\lambda t} + P_0 \sum P_i e^{-\frac{\rho_b x}{\Lambda_i}} \left[\frac{1 - e^{-(D/\Lambda_i + \lambda)t}}{D/\Lambda_i + \lambda} \right] \quad (2)$$

となり、核種濃度の時空間分布を与える式が得られる。ここで C_0 は初期核種濃度 (atoms g⁻¹) である。侵食平衡による定常状態は、式 (2) の $t \rightarrow \infty$ 極限に従う。すなわち、

$$C_{steady} = P_0 \sum \frac{P_i e^{-\frac{\rho_b X}{\Lambda_i}}}{D_{BG}/\Lambda_i + \lambda} \quad (3)$$

であり、 D_{BG} は侵食平衡をもたらした地表面の背景削剥速度 (g m⁻² yr⁻¹)、 X はその状態での任意時点における深度 (m) である。

いま、断層運動による地表削剥速度の変化 ($D_{BG} \rightarrow D_R$) を考え、地表面の核種濃度の算出を想定すると、式 (2) において $C_0 = C_{steady}$ 、 $x = 0$ 、また、式 (3) において

$$X = \frac{D_R T}{\rho_b} \quad (4)$$

とおけるので、断層運動開始以降の地表面核種濃度 C_{surf} (atoms g⁻¹) は、

$$C_{surf} = P_0 \sum \frac{P_i e^{-(D_R/\Lambda_i + \lambda)T}}{D_{BG}/\Lambda_i + \lambda} + P_i \left[\frac{1 - e^{-(D_R/\Lambda_i + \lambda)T}}{D_R/\Lambda_i + \lambda} \right] \quad (5)$$

と書ける。ここで D_R は断層運動の影響を受けた地表面削剥速度 ($\text{g m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)、 T は断層運動の継続時間 (yr) である。式 (5) において、 $D_R = D_{BG}$ のとき $C_{\text{surf}} = C_{\text{steady}}$ であり、削剥速度が変わらなければ核種濃度に変化はないが、断層近傍の上盤側で断層変位を打ち消すような削剥速度変化がある場合 (すなわち断層の上限変位速度 $F = D_R - D_{BG}$)、断層を挟む両盤での核種濃度の比較に基づいて、断層の上限変位速度や断層運動の継続時間に関する情報が得られるものと期待される。

3. 得られた成果

背景侵食速度を 100 mm kyr^{-1} とし、断層の上下変位速度 $200, 100, 50 \text{ mm kyr}^{-1}$ また断層運動継続時間をそれぞれ $50, 100, 200 \text{ kyr}$ とした場合の計算結果を図 1 に示す。背景侵食速度や断層変位速度は岩盤の密度を与えて、 LT^{-1} 単位で付与している。また、断層の上盤側で、侵食基準面低下の影響が、どの程度の拡がりをもって削剥速度に反映されるかを調整した。核種生成率については海水準付近を想定し、 $5 \text{ atoms g}^{-1} \text{yr}^{-1}$ としている。

この条件下では、断層の上下変位速度とその継続時間の組み合わせにより、結果として形成される地形断面の形状に差異はないが、断層の上下変位速度を反映して、核種濃度の空間分布が変化することがわかる。このことは、例えば、地形から断層活動度の大小が判読できない場合であっても、上下盤の核種濃度の差異に基づいて断層の上下変位速度が評価されることを示している。また、断層運動の累積が削剥によってキャンセルされ、地形的に断層崖が不明瞭となる場合でも、上下盤の核種濃度には差異があることが期待され、断層活動のシグナルを検出できることが期待できる。宇宙線生成核種の加速器質量分析における精度を考えると、正味変位速度 100 mm kyr^{-1} 程度 (一回あたりの上下変位量が 0.5 m で、5 千年再来周期での断層活動に相当) の断層運動が十分に検知できることになる。核種蓄積のモデル計算を通じて、地質的不連続面をまたぐ領域での宇宙線生成核種分析が、断層活動度の定量評価に有用であることが示された。

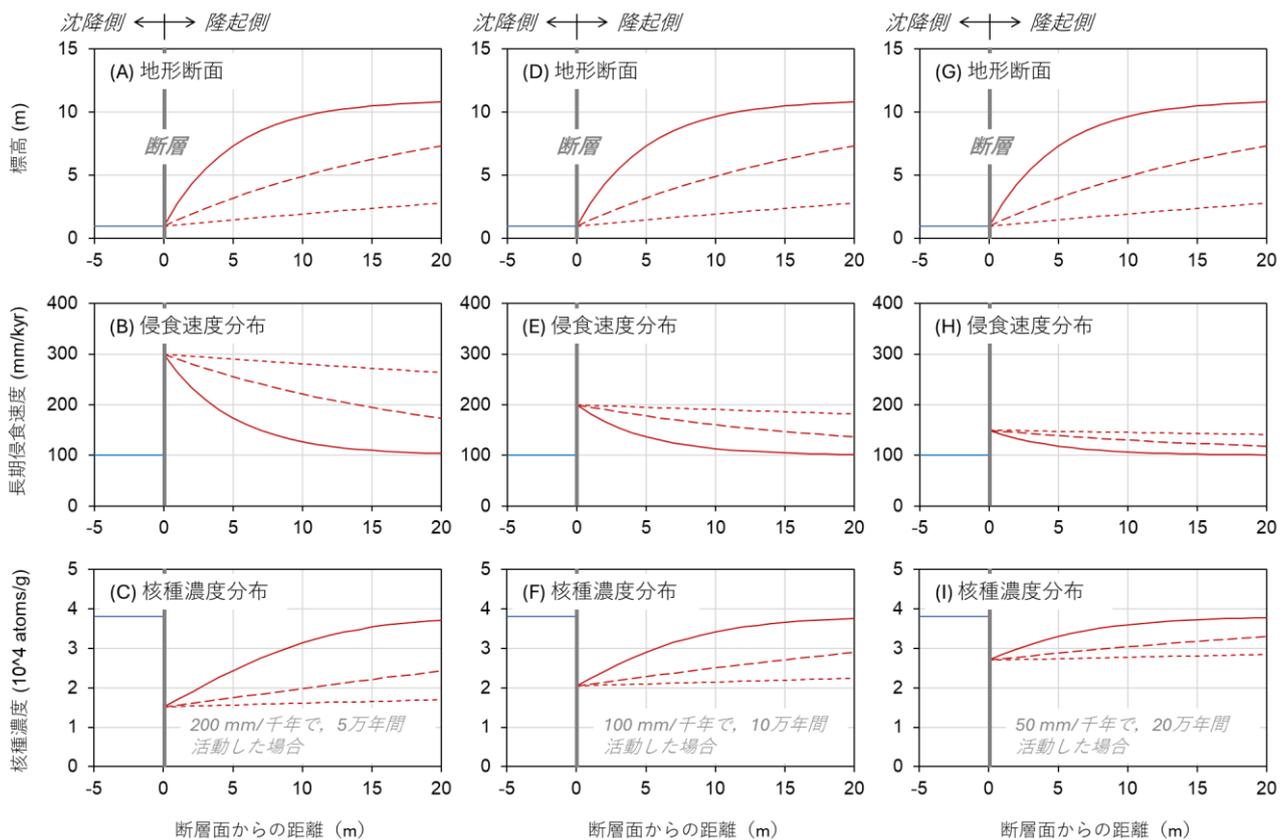


図 1. 断層運動に伴う地形および侵食速度の変化とそれに対応した核種濃度の空間分布。青線が下盤，赤線が上盤。