

¹⁰Be 年代測定を用いた断層活動性評価手法に関する研究

2024 年度

松四 雄騎*

1. 研究の目的

断層の活動度評価において、断層の上下変位に伴う削剥速度の変化を、宇宙線生成核種（例えば石英中に生成・蓄積している ¹⁰Be）の深度分布に基づいて検出する方法が有用である可能性がある。断層両側の上下盤が同じ地質体で構成され、物質密度や継承核種の量に差異を考慮する必然性が無く、かつ地表面高度にも不連続性が認められない場において、断層を挟んだ両盤で宇宙線生成核種の深度プロファイルに差異が無ければ、観測された濃度にまで核種が蓄積した期間、その断層には削剥速度変化を伴う上下変位が無かった蓋然性が高いと判定できる。このとき、核種蓄積に要した時間の評価、すなわち、どれほどの過去にまで遡って断層が変位してこなかったと推定できるか、という点には、未だ検討の余地が残っている。核種蓄積の時間スケール評価においては、宇宙線フラックスの変動に伴う核種生成率の時間変化、および、核種生成をもたらす中性子核破碎とミューオン相互作用の地下減衰特性の差異の取り扱いが重要となる。ここでは、「時間積分スケーリングファクター」ならびに「平均化時間スケール」の概念を用いて、核種濃度の深度分布データへの、核種の生成蓄積モデルのフィッティング手順を最適化し、課題を解決する方法を考案する。

2. 宇宙線生成核種 ¹⁰Be の蓄積モデルと解析手順

地表近傍の岩盤に含まれる石英中の ¹⁰Be について、長期間の定常的削剥により成立する平衡濃度は、宇宙線照射による核種の生成と削剥による物質除去および放射壊変を考慮した微分方程式の解として、次のように表すことができる。

$$C = \sum \frac{P_{\text{SLHL}} f_i p_i}{D/\Lambda_i + \lambda} e^{-\frac{\rho_b x}{\Lambda_i}} \quad (1)$$

ここで C は核種濃度 (atoms g⁻¹)、 t は時間 (yr)、 P_{SLHL} は高緯度海水準での核種生成率 (atoms g⁻¹ yr⁻¹)、 f_i は時間積分スケーリングファクター、 x は深度 (m)、 p_i は核種生成における複数過程の深度零点での寄与率、 Λ_i は核種生成に関する粒子の減衰長 (g m⁻²)、 D は地盤の削剥速度 (g m⁻² yr⁻¹)、 ρ_b は地盤を構成する物質の密度 (g m⁻³)、 λ は放射壊変定数 (yr⁻¹) である。添え字の i は、¹⁰Be を生成させる過程として酸素・ケイ素原子の中性子核破碎、負ミューオン捕獲、高速ミューオン相互作用の 3つがあることを意味している。時間積分スケーリングファクターは、解析対象地点の地上核種生成率を算出する際に、求める値の、高緯度 (>60°)・海水準 (Alt. = 0 m) での核種生成率に対する比として与えられる。

時間積分スケーリングファクターの値は、解析対象地点の緯度・経度・標高および地磁気強度変遷モデルを設定すれば、近年公表されている露出年代計算ツールの副産物として、任意時間に対して求めることができる（図 1）。図中で横軸にとった時間は、「ある過去の時点から現在までの期間」を意味しており、縦軸の時間積分スケーリングファクターは「その期間の平均値」である。日本付近 (35°N, 135°E) での値をみると、過去 100 万年間に最大 20%程度の変化があったことがわかる。これは式 (1) を用いたデータ解析において、対象地点における核種生成率 ($P_{\text{SLHL}} f_i$) の見積もりが、有意な系統誤差の起源となり得ることを示している。

*京都大学・教授

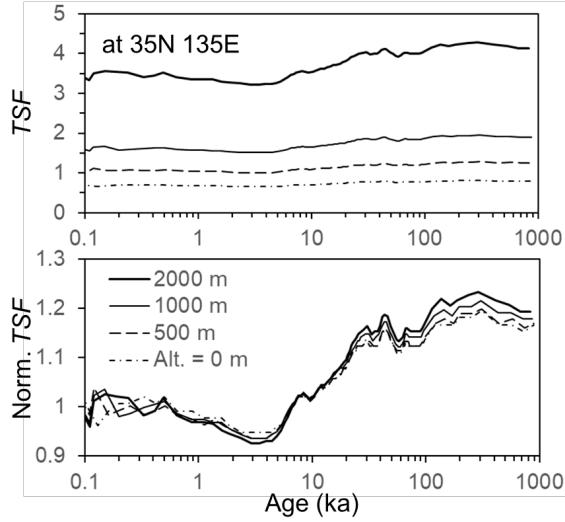


図 1. 日本付近における標高別の時間積分スケーリングファクターの計算例（上段）および現在の値で正規化した変遷（下段）。

石英中に ^{10}Be を生成させる中性子核破碎と負ミューオン捕獲および高速ミューオン相互作用は地中での減衰特性が異なるため、各々の過程で生成した ^{10}Be の存在量に反映される平均削剥速度が代表している時間もまた異なる。この削剥速度の平均化時間スケール T_i (yr) は、次式によって定量化される。

$$T_i = A_i/D \quad (2)$$

減衰長 A_i は、核破碎を起こす高速中性子、原子核捕獲される低速負ミューオン、電磁相互作用により核種を生成する高速ミューオンの順に長くなり、地中浅部では中性子の寄与が、深部ではミューオンの寄与が大きくなる。すなわち、核種濃度が定量された深度毎に、算出される削剥速度が平均化している時間スケールは異なり、深いところほど、より長い時間（古い時代まで）を含む削剥速度を代表することになる。

核種濃度の深度分布データに対して、削剥速度 D について解析解の得られない式（1）で表されるモデルカーブをフィッティングするには、次の手順で逆解析を実行することが望ましい。

- 1) 任意の削剥速度を与える、式（2）により核種生成の各過程について平均化時間スケールを求める。
- 2) その時間スケールでの時間積分スケーリングファクターを生成過程毎に求め、
- 3) 式（1）を用いて核種濃度の深度プロファイルを計算する。
- 4) 核種濃度データに対する残差からモデルカーブの適合度を評価する。
- 5) 上記 1) から 4) を繰り返し、削剥速度の最尤値を得る。
- 6) モデルパラメータおよびデータを不確かさの範囲で変化させ、上記 5) を多数回試行することでモンテカルロシミュレーションを実行し、削剥速度の不確かさを評価する。

この手順を採用することにより、宇宙線フラックスの時間変化および中性子とミューオンの減衰特性の差異を考慮した確度の高い削剥速度値を得ることができる。

得られた削剥速度を用いて、各過程により生成した核種の存在量を、深度毎に求めることができ、全体の濃度値に対する寄与率も算出される。この深度毎の寄与率で重みづけすることで、平均化時間スケールの深度プロファイルも計算することができる。こうした図化により、宇宙線生成核種の濃度データが代表している時間スケールの深度依存性が可視化されるとともに、どの程度の深さまでの試料を採取すれば、どれほどの時間まで遡って推論を行うことができるかについて、簡便に目安を得ることができるだろう。

3. 今後の展望

実際の核種濃度の深度分布データに対するモデルカーブのフィッティングを行うことにより、手法の適用性を検証することが望まれる。宇宙線生成核種により遡ることのできる時間スケール（過去100万年程度）において、上下変位があったとは考えにくい地質学的に古い時代の断層を対象として、断層を挟んだ両盤で、核種濃度の深度プロファイルに差異が認められないことが検証できると良い。また、過去から現在にかけて、テクトニクスの変化や断層の変位などにより、削剥速度が有意に変化した蓋然性の高い場において、データの取得とモデルのあてはめを行うことにより、本モデリングの有用性を確認することも有益であろう。