

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H05308・20K20329

研究課題名（和文）宇宙線生成核種の分析にもとづく断層活動度の新しい評価法の開発と検証

研究課題名（英文）Assessing fault activity using terrestrial cosmogenic nuclides

研究代表者

松四 雄騎（Matsushi, Yuki）

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：90596438

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,000,000円

研究成果の概要（和文）：地表近傍の造岩鉱物中に蓄積する宇宙線生成核種を用い、その存在量が地表の削剥速度を反映した平衡濃度となることを利用して、対象とする断層に上載層が無い場合でも、また、埋没有機物等の年代試料が得られない場合でも、過去数千年から数十万年スケールでの断層の活動度を評価する新しい手法を提案し、その有用性を検証した。断層近傍において複数の小流域で溪流堆砂や、露頭で岩盤を試料を採取し、加速器質量分析により石英中の宇宙線生成核種であるBe-10を定量した。その結果、本手法を用いて、断層の上下変位速度を定量的に評価できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

断層活動度の定量化は、内陸地震のリスク評価や原子力発電所の安全性評価、高レベル放射性廃棄物の地層処分に際する地質環境の長期安定性評価において重要である。とりわけ原子力発電所の稼働における安全性確保のために、近傍断層の活動度を正確に推定する方法論の開発は喫緊の課題となっている。現在のところ、断層活動度の評価は、断層直上の堆積年代がわかっている地層（上載層）の変位量や、形成年代が特定可能な地形面の変形量などに基づいて行われているが、条件によっては、ある断層がいわゆる活断層であるかどうかの判定が難しいことがある。本研究ではこの問題を解決する一つの方法を提示することができた。

研究成果の概要（英文）：This study demonstrated a new methodology for assessing long-term fault activity by using terrestrial cosmogenic nuclides of which the concentration reached to an equilibrium state reflecting surface denudation rates. This approach is applicable even under conditions without deformed covering strata or landforms, and any buried materials for dating in the overburden. The method was validated via measurements of cosmogenic Be-10 by accelerator mass spectrometry for samples obtained from fluvial sediments and outcrops.

研究分野：地形学

キーワード：活断層 宇宙線生成核種 加速器質量分析 変位速度 削剥速度 侵食基準面 地形発達

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

断層活動度の定量化は、内陸地震のリスク評価や原子力発電所の安全性評価、高レベル放射性廃棄物の地層処分に際する地質環境の長期安定性評価において重要である。とりわけ原子力発電所の稼働における安全性確保のために、近傍断層の活動度を正確に推定する方法論の開発は喫緊の課題となっている。現在のところ、断層活動度の評価は、断層直上の堆積年代がわかっている地層(上載層)の変位量や、形成年代が特定可能な地形面の変形量などに基づいて行われている。ある断層が、いわゆる活断層であるかどうかは、現在と同様の地殻応力場の継続期間(概ね過去40万年間)において活動した履歴が認められるかどうかを基準となるが、一般にその判定は難しい。なぜなら、対象とする断層が上載層を持たなかったり、断層上に明瞭な地形面を欠いていたりする場合が多く、またそれらがあつたとしても、年代の特定が困難であることが多いためである。年代既知の広域テフラや海成堆積物といった鍵となる地層、あるいは段丘のような形成時期の特定できる地形面が断層近傍に存在しない状況は、日本のような湿潤変動帯ではごく一般的である。また、地層の年代決定に常套的に用いられる¹⁴C年代測定法は、埋没有機物が分析試料として得られるかどうか依存し、かつ5万年よりも古い地層には適用できない。鉱物を対象とした光ルミネセンス年代測定も同様の適用限界をもつ。

そこで、本研究では、地表近傍の造岩鉱物中に蓄積する宇宙線生成核種を用いた手法を提案する。この方法は、上載層の有無や地形面の保存度といった環境条件に依存せず、また、適切な場所を選択すれば他の年代法にみられるような適用時間スケールの制約も強く働かない。宇宙線生成核種の分析対象物質は、地表を構成する鉱物そのものであるため、特別な試料を地中から見つけ出す必要がない。その上、上盤側と下盤側の宇宙線生成核種の濃度から算出される削剥速度の差異から、直接的に断層の上下変位速度を推定できる。宇宙線生成核種濃度の変化は、地表面の削剥に対して極めて高感度であり、断層の運動速度が小さい場合も定量化することができる。地表近傍鉱物中の宇宙線生成核種は 10^4 - 10^6 atoms/g程度の存在量であり、地点の標高にも依存するが、この濃度は 10^0 - 10^3 mm/kyrの削剥速度に相当する。すなわち、本手法を用いることで、ある断層が活断層であるかどうかの判定はもちろん、現在、断層活動度区分の基準値となっている 10^1 mm/kyrよりも小さい速度での上下変位も検出できる。

2. 研究の目的

本研究では、内陸地震のリスク評価や原子力発電所の安全性確保、高レベル放射性廃棄物の地層処分に際する地質環境の長期安定性評価を念頭に、断層の活動度を評価する全く新しい方法論を提案し、その有用性を検証することを目的とする。提案する手法は、地表近傍の造岩鉱物中に蓄積する宇宙線生成核種を用いるものであり、対象とする断層に上載層が無い場合でも、また、埋没有機物等の年代試料が得られない場合でも、過去数千年から数十万年スケールでの断層の運動を評価できる。これは、断層の上盤側と下盤側における鉱物中の宇宙線生成核種の存在量が、断層運動に伴う地表の削剥速度を反映した、互いに異なる平衡濃度となることを利用するものである。本研究では、活断層であることが判明している場所および現在は断層の活動が無いと判明している場所のそれぞれで本手法を適用し、その有用性を実証する。

3. 研究の方法

地表面は永続的に宇宙線の照射を受け、地表近傍の鉱物中には宇宙線生成核種が蓄積している。地表面が削剥されているとき、鉱物中の宇宙線生成核種の濃度は、その場の削剥速度を反映した動的平衡に達し、削剥が速いほど小さい値で、削剥が遅いほど大きい値で平衡状態となる。核種の生成率は、緯度と標高から算定可能であるため、測定された核種濃度から、削剥速度を算出することができる。本研究では、上下変位をもつことが明らかとなっている活断層、および第四紀における活動度が極めて低いことがわかっている断層をいくつか選定し、断層の上盤側と下盤側で、それぞれ試料を採取する。断層運動によって、断層の上盤側と下盤側では、侵食基準面の低下速度が異なり、それに追従して地表面の削剥速度もまた異なるはずである。本手法では、宇宙線生成核種の濃度差から断層の上盤と下盤での削剥速度の差異を求め、断層の長期平均的な上下変位速度を定量的に評価する。過去の活動が既知の断層で手法の有用性を確認したのち、活動度が未知の断層に適用する。

具体的な試料の採取方法は以下の二通りである。

i) 流域の削剥速度の空間分布を求めるアプローチ

断層周辺の広い範囲の複数の小流域出口において、流域から排出された溪流堆砂中の石英粒子の中に含まれる宇宙線生成核種¹⁰Beを分析する。これにより、上流域の空間平均侵食速度を決定する。その空間分布に基づき、断層運動がもたらした侵食基準面低下を検出し、現在の地形を作り出した断層運動の長期的な変位速度を定量的に評価する。まず、主谷が断層を横切って流下するとき(Fig. 1A)、主谷に注ぐ支谷の削剥速度は、断層のすぐ上流側(主谷の遷急区間)で大きいはずであり、断層よりも下流側の支谷のそれとの差異が、断層運動を反映するものと捉え

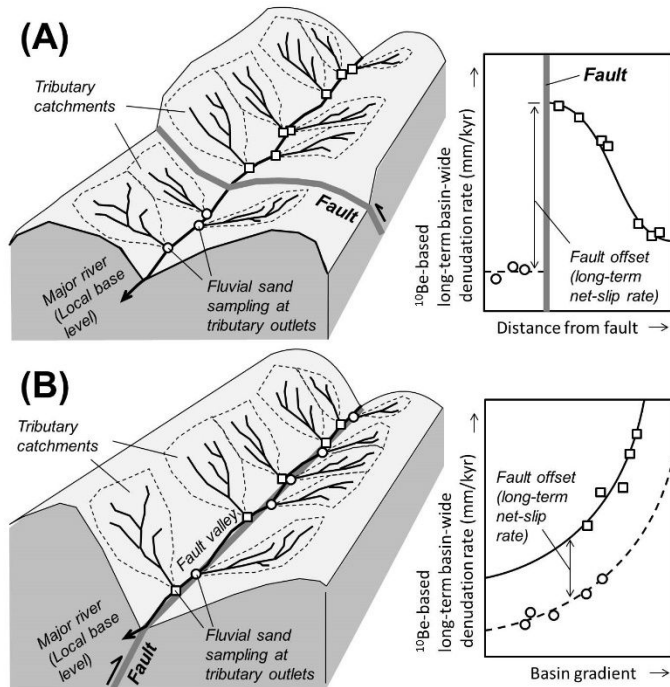


図 1. 断層近傍の支谷の削剥速度から断層運動を評価する方法論の概念図。(A) 主谷が断層を横切る場合。(B) 主谷が断層に沿って発達する場合。主谷に沿って複数の支谷の出口で溪流堆砂を試料として採取する(上下図とも四角シンボルが上盤側, 円シンボルが下盤側)。溪流堆砂の宇宙線生成核種濃度から支谷流域の削剥速度を決定でき, 断層からの距離や流域の地形を考慮しつつ, 上下盤で比較することで, 断層の長期平均的な変位速度を推定することが可能となる。

の削剥速度を反映した差異が生じる(断層上盤側でより速く削剥が起こっているはずであり, 宇宙線生成核種の濃度が小さくなる)。

得られた核種濃度データに対し, 宇宙線照射による核種の生成, 放射壊変, 削剥による物質損失を考慮したモデルカーブをフィッティングさせる。地球上の任意地点における宇宙線生成核種の生成率や, 地中における宇宙線フラックスの減衰定数, 核種の壊変定数といったパラメータは既知であるため, モデル内の未知数はその地点の地表面削剥速度のみである。よって断層の上盤・下盤における地表面の削剥速度を算出でき, それらの差分から断層運動の速度を推定することができる。

宇宙線生成核種の定量には, 試料の物理・化学的処理のうち, 加速器を用いた高エネルギーでの質量分析を要する。これは, 鉱物中に存在する宇宙線生成核種が, $<10^6$ atoms/g と極微量であることによる。まず試料を粉碎整粒し, 酸を用いた超音波処理および重液によって, 目的鉱物を分離する。得られた試料に担体を添加したのち, 酸分解してイオン交換法と沈殿精製によって目的元素を単離する。伝導体粉末を添加したのち, 専用の分析ホルダーにプレスする。試料はタンデム加速器のイオン源に装填し, 加速器質量分析により同位体比を決定する。得られた同位体比を既知の担体添加量に乘じ, 分解した試料質量で除することで核種濃度を算出できる。

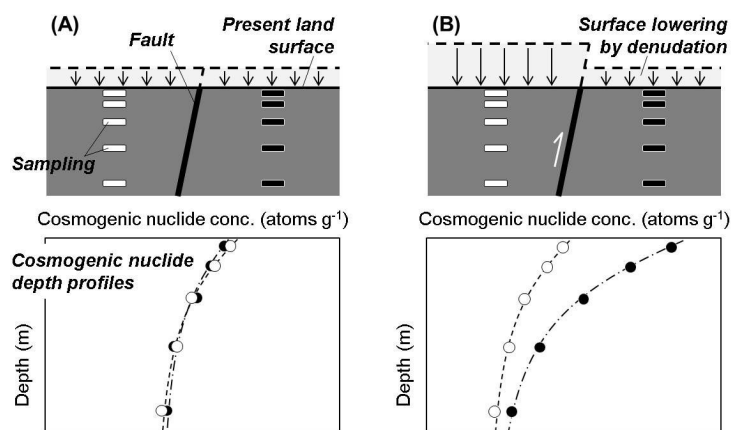


図 2. 宇宙線生成核種濃度の深度プロファイルを用いて高精度・高精度に断層運動を推定する方法論の概念図。白抜きシンボルが上盤側, 黒塗りシンボルが下盤側である。(A) 活動していない断層の場合。上下盤の宇宙線生成核種濃度の深度プロファイルに有意な差は無い。(B) 上下変位を伴う活断層の場合。削剥速度の大きい上盤側で, 核種濃度は低くなる。このとき, 両盤での核種濃度の差分から, 断層の上下変位速度を推定することが可能となる。

ることができる(図 1A 右)。一方, 主谷が断層の走向方向に延び, 断層谷が発達しているとき(図 1B), 支谷は断層の上盤側で系統的に急勾配となり, 相対的に削剥速度も大きいはずである。このとき, 流域の傾斜が削剥速度に与える影響を考慮に入れつつ, 上下盤の削剥速度を比較することで, 断層運動に伴う侵食基準面低下を定量的に評価できる(図 1B 右)。

ii) 核種濃度の深度プロファイルを求めるアプローチ

地表での断層の位置が判明している場合には, 地中の宇宙線生成核種 ^{10}Be の濃度分布に基づき, より高精度・高確度で断層変位速度を決定する方法を提案・検証する。この方法では, 断層の上下盤それぞれで深さ数メートル程度まで深度ごとに試料を採取する(図 2 上段)。試料中の宇宙線生成核種を分析すると, 地中での核種濃度のプロファイルが得られるが, それは地表面の削剥速度を反映している(Fig. 2 下段)。断層が長期に渡って変位していない場合, 断層の上下盤での核種濃度の深度プロファイルに有意な差は無い。一方, 断層が活発に変位している場合, 上下盤の核種濃度の深度プロファイルには, それぞれの地表面

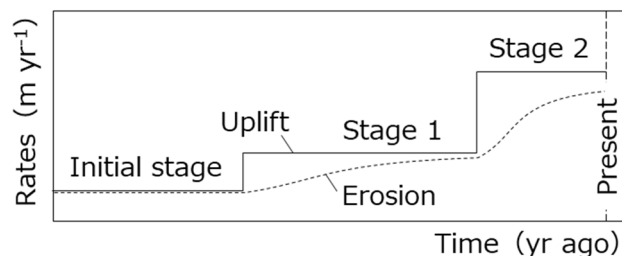
4. 研究成果

まず、断層の活動履歴に関する情報の多いエリアを対象として、本手法を適用しうる断層の文献調査および現地調査を行った。先行研究の情報や気候環境データ等に基づき、西南日本、中部地方、東北・北海道地方を対象にいくつかの内陸活断層を選定し、地形と地質の状況を地理情報システムと踏査によって確認した。研究対象候補地の空間情報解析を通じて、侵食基準面変化と削剥速度変遷の履歴が、河川や流域の地形に残されていることを確認し、地理情報システムを用いて、遷急点の遡上を伴う河川縦断形の時間変化や流域の急峻度の増大に対する応答としてのマスマーブメントによる斜面の侵食速度の変化などに着目し、地形発達過程をシミュレートするための定量的モデリングを行った。

踏査の際には、計画した複数種の試料を採取し、宇宙線生成核種の分析に供した。中国・近畿・中部地方では、断層運動に支配されたローカルテクトニクスをもつ場や、活動的な断層が無く安定的・連続的な地形進化が生じている場において、斜面の起伏量や河川の縦断形に差異が認められる複数の山地流域を対象に渓流堆砂を採集し、石英中の宇宙線生成核種である ^{10}Be の分析を行って流域の空間平均削剥度を算出した。現成河川の堆積物から現在の地形条件に対応した削剥速度を把握する一方、過去にさかのぼって地形削剥速度を復元するため、既存の大深度地質ボーリングを活用するアプローチ（図3）を新たに見出し、近畿地方の第四系に含まれる宇宙線生成核種の分析を行った。また、中部地方の断層をターゲットに、断層露頭の上下盤で深度別試料を採取し、宇宙線生成核種濃度の深度プロファイリングを行った。分析に際しては、鉱物中の宇宙線生成核種の分析前処理手順について高効率化を検討し、既存手法の改良を試みた。また、加速器質量分析における核種の定量感度と精度・確度の向上に資する解析手法について検討した。

分析の結果、断層を挟む上下盤で、地表近傍物質中の宇宙線生成核種濃度に有意な差異がない（すなわち断層の上下変位検出されない）例や、断層からの距離に従って宇宙線生成核種の濃度が変化する例を、多様な空間スケールでデータとして得ることができた。また、低地を埋積する砂礫中の宇宙線生成核種の濃度が、深度に対して系統的に変化している例を発見し、隆起山地前縁の堆積物にその山塊の削剥史が記録されている可能性があることを見出した。さらに、断層変位に伴う侵食基準面の低下に対する応答の帰結として地形と削剥速度が経時的に変化する過程を定量化したモデルと組み合わせることで、それに基づいて地域的なテクトニクスを復元する方法論を構築することができた（図3）。いずれのアプローチも、個別の方法論を独自の発想で合体させたものといえるが、その組み合わせにより開拓された手法はこれまでにない革新的なものとなった。これにより任意断層の活動度について、従来の定性的な階級区分から脱却し、定量的評価を展開するための足掛かりが整った。

(A) Tectonics and erosional response



(B) Landscape evolution

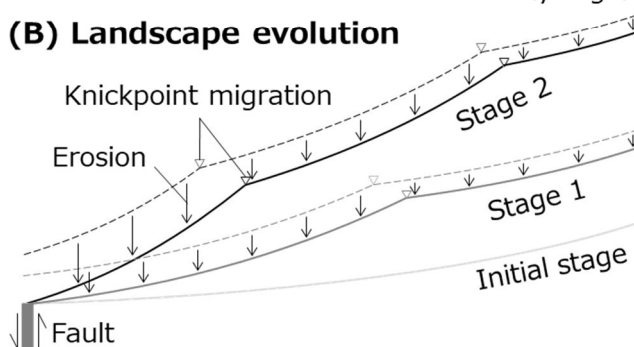


図3. 山塊の隆起と地形の応答の概念図。(A)段階的な隆起速度の増大があると、それに対して山地の流域の削剥速度は、タイムラグをもって追従するように増加する。(B)このとき流域河川の縦断形は遷急点の遡上を伴いながら遷移し、開析された斜面から生産された土砂は、削剥速度に応じた宇宙線生成核種濃度を保持して山麓低地に堆積する。

図3. 山塊の隆起と地形の応答の概念図。(A)段階的な隆起速度の増大があると、それに対して山地の流域の削剥速度は、タイムラグをもって追従するように増加する。(B)このとき流域河川の縦断形は遷急点の遡上を伴いながら遷移し、開析された斜面から生産された土砂は、削剥速度に応じた宇宙線生成核種濃度を保持して山麓低地に堆積する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shnizai Zakeria, Matsushi Yuki, Tsutsumi Hiroyuki	4. 巻 795
2. 論文標題 Late Pleistocene slip rate of the Chaman fault based on 10Be exposure dating of offset geomorphic surfaces near Kabul, Afghanistan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 228593 ~ 228593
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tecto.2020.228593	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Watakabe Takuma, Matsushi Yuki	4. 巻 180
2. 論文標題 Lithological controls on hydrological processes that trigger shallow landslides: Observations from granite and hornfels hillslopes in Hiroshima, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 CATENA	6. 最初と最後の頁 55 ~ 68
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.catena.2019.04.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hattanji Tsuyoshi, Matsushi Yuki, Matsuzaki Hiroyuki, Wasklewicz Thad A.	4. 巻 329
2. 論文標題 The role of debris flow on total denudation in small basins of the Ashio Mountains, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geomorphology	6. 最初と最後の頁 129 ~ 137
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.geomorph.2018.12.022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ohta R., Matsushi Y., Matsuzaki H.	4. 巻 405
2. 論文標題 Use of terrestrial cosmogenic 10Be to quantify anthropogenic sediment yield from mountainous watersheds: application in reconstructing environmental change in the Tanakami Mountains, central Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geomorphology	6. 最初と最後の頁 108201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.geomorph.2022.108201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 松四雄騎	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 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	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 RADIOISOTOPES	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 松四雄騎・松崎 浩之
2. 発表標題 造岩鉱物中の宇宙線生成核種を用いた地形の形成年代決定における確度の制約条件
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Matsushi Y., Matsuzaki H.
2. 発表標題 A method for background correction in ^{10}Be detection: evaluation of indirect isobaric interference by ^7Be generated at the entrance window of a gas counter
3. 学会等名 15th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	笹 公和 (Sasa Kimikazu) (20312796)	筑波大学・数理物質系・准教授 (12102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	松崎 浩之 (Matsuzaki Hiroyuki) (60313194)	東京大学・総合研究博物館・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関