

# 横ずれ活断層の平均変位速度における過小評価の可能性 —根尾谷断層を対象とした宇宙線生成核種年代測定法に基づく検証— Underestimation of the long-term slip rate of an active strike-slip fault: Verification on the Neodani fault based on terrestrial cosmogenic nuclide dating

22N3100015H 小倉 祐弥 (地形・地質学研究室)  
Ogura YUYA / Geomorphology and Geology Lab.

**Key Words:** active strike-slip fault, long-term slip rate, Neodani fault, cosmogenic nuclide

## 1. はじめに

世界有数の地震大国である日本国内には約 2000 条もの活断層が存在し、各活断層について信頼性の高い危険度評価が求められる。大地震の発生間隔や規模を評価するための最も基本的な活断層のパラメータが平均変位速度であり、この値は活断層による地形の累積ずれ量をその地形の形成年代で除することで求められる。

国内の活断層の 3 割強を占める横ずれ活断層の平均変位速度は、2 段の段丘の間の崖（段丘崖）の累積横ずれ量と、段丘崖下の段丘面に河川の営力が及ばなくなった年代（離水年代）から推定される（図-1a）。しかし、段丘崖の横ずれ地形が確認されることは多くないため、国内の横ずれ活断層のうち 4 割強については、その代替として段丘を刻む谷（開析谷）の横ずれが用いられている（図-1b）。開析谷に基づく評価においては、湿潤気候の日本列島では段丘面の離水後すみやかに開析谷が形成されると考え、段丘面の離水年代が開析谷の形成年代と等しいと仮定して平均変位速度が推定されてきた。しかし、離水から開析谷が形成されるまでに有意な時間差がある場合、平均変位速度は過小評価されていることになる。

近年、航空レーザー測量技術の発達・普及によって、空中写真では全く見えない植生下の微地形を詳細に捉えることが可能となった。この技術により、国内外で新たな活断層地形の発見が相次いでいるが、特に濃尾断層帯、根尾谷断層北部に位置する能郷地区では、段丘崖の明瞭な累積左横ずれが発見された<sup>2)</sup>。根尾谷断層ではすでに開析谷の横ずれに基づいて平均変位速度が推定されており<sup>3)</sup>、能郷地区の段丘面の離水年代が明らかになれば、横ずれ活断層の平均変位速度における過小評価の可能性を検証できる。しかし、従来の火山灰分析や放射性炭素年代測定では、段丘面の離水年代を十分に拘束することができていなかった<sup>1)</sup>。そこで本研究では、宇宙線生成核種  $^{10}\text{Be}$  による年代測定法を適用することによって能郷地区の段丘面の離水年代を決定し、段丘崖の横ずれに基づいて根尾谷断層の正確な平均変

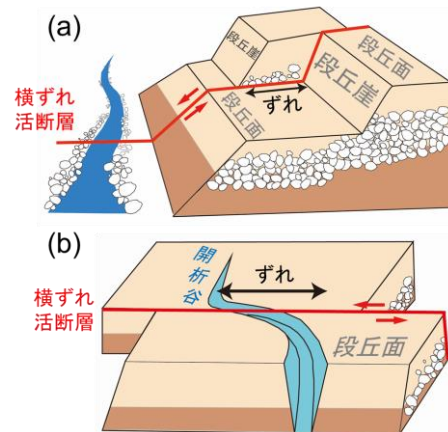


図-1 活断層による地形の累積横ずれの模式図  
(a) 段丘崖の横ずれ (b) 開析谷の横ずれ

位速度を推定した。

## 2. $^{10}\text{Be}$ による年代測定法の原理

宇宙線生成核種  $^{10}\text{Be}$  は、地表付近の岩石・堆積物中の石英 ( $\text{SiO}_2$ ) に宇宙線が照射されることで生成される。石英中の  $^{10}\text{Be}$  の蓄積量は時間の経過と共に増加するため、基本的には  $^{10}\text{Be}$  の濃度  $C$  (atoms/g) とその生成率  $P_0$  (atoms/g/yr) から、石英を含む岩石や堆積物が地表に露出していた時間 (年代)  $t$  (yr) が推定できる。ただし、岩石や堆積物には、現在の位置に定着する以前に既に生成されていた  $^{10}\text{Be}$  (継承核種) が含まれるため、その濃度 (継承核種濃度)  $C_0$  (atoms/g) を評価した上で  $C$  から  $C_0$  を差し引いて  $t$  を求める必要がある。本研究では、 $P_0$  が深度方向に指数関数的に減衰する性質を利用して  $t$  と  $C_0$  を同時に決定する深度断面法<sup>4)</sup>に、段丘面の形成後一定の速度で風成堆積物が段丘面を被覆するプロセスを加えたモデル<sup>5)</sup>を改良して用いた。具体的には、風成堆積物による被覆を受ける前の地表面からの深度  $x$  (m) における、 $t$  (yr) 後の  $^{10}\text{Be}$  濃度  $C$  は以下の式で表される。

$$C = C_0 e^{-\lambda t} + P_0 \sum_i \alpha_i e^{-\frac{\rho_b x}{\Lambda_{bi}}} \left[ \frac{e^{-\frac{\rho_l H}{\Lambda_{li}} t} - e^{-\lambda t}}{\lambda - \frac{\rho_l H}{\Lambda_{li}} t} \right] \quad (1)$$

$\lambda$ は $^{10}\text{Be}$ の壊変定数<sup>6)</sup> ( $= 5.00 \times 10^{-7} \text{ / yr}$ ) ,  $\rho_b$ および $\rho_l$ はそれぞれ、段丘構成層および風成被覆層の密度 ( $\text{g/m}^3$ ) ,  $H$ は現在の風成被覆層の厚さ (m) である.  $i$ は $^{10}\text{Be}$ の各生成過程を表し,  $\alpha_i$ は各生成過程の寄与率,  $A_{bi}$ および $A_{li}$ はそれぞれ、段丘構成層中および風成被覆層中の宇宙線の減衰長 ( $\text{g/m}^2$ ) である.

$P_0$ の深度減衰は段丘構成層や風成被覆層の密度に依存することから,  $C$ の算出にはこれらを正確に見積もることが必要となる. また, 積雪の遮蔽によっても $P_0$ が減少することから, 積雪のある場所においては, その場における積雪量を見積もり,  $P_0$ を補正する必要がある.

### 3. 研究地域概要

1891年の濃尾地震 (M8.0) 時に活動したことで知られる根尾谷断層は, 福井県南部から岐阜県の濃尾平野北部まで約42 kmにわたって走る左横ずれ活断層である (図-2, 挿入図). この断層の中部では, 複数地点の段丘面の開析谷の左横ずれに基づき, 平均変位速度が1.3 ± 0.3 m/千年 (以下, kyr) と推定されている<sup>3)</sup>.

本研究対象地である能郷地区は根尾谷断層の中北部に位置し, 航空レーザー測量データを用いることにより, 中位段丘面のうち, 上位 ( $M_H$ ) 面と下位 ( $M_L$ ) 面との段丘崖に170 ± 10 mの明瞭な左横ずれが発見された<sup>1)2)</sup> (図-2). この段丘崖の変位は段丘崖下の地形面である $M_L$ 面の離水後に累積を開始することから,  $M_L$ 面の離水年代が明らかになれば根尾谷断層の正確な平均変位速度を求めることが可能である. しかし, この段丘面では先行研究<sup>1)7)</sup>により, ピット・ボーリング掘削調査や火山灰分析・放射性炭素年代測定が実施されているものの, 少なくとも始良Tn火山灰の降灰 (約3000年前) 以前に離水したこと以上の情報は得られていなかった.

### 4. 研究手法

#### (1) 地形判読および現地予察調査

深度断面法の適用にあたり, 深度ごとに $^{10}\text{Be}$ 濃度測定用試料を採取するためのピットを掘削する必要がある. その地点を選定するため, まずは能郷地区およびその周辺の地形判読および現地予察調査を行った. 地形判読には, 国土交通省中部地方整備局越美山系砂防事務所が2008年に実施した航空レーザー測量のデータ (フィルタリング済みの1 mグリッドの数値標高モデル) から作成されたMPI赤色立体地図ステレオペア<sup>2)</sup>を使用した. 段丘面を現河床との比高に基づいて区分するとともに, 断層変位地形をマッピングした. その後, 現地予察調査を行い, 近傍斜面に由来する土砂の被覆や浅い開析谷, 人工改変などの影響を避け, 段丘面原面の保存状態が最も良いと思われる位置をピット掘削地点として選定した.

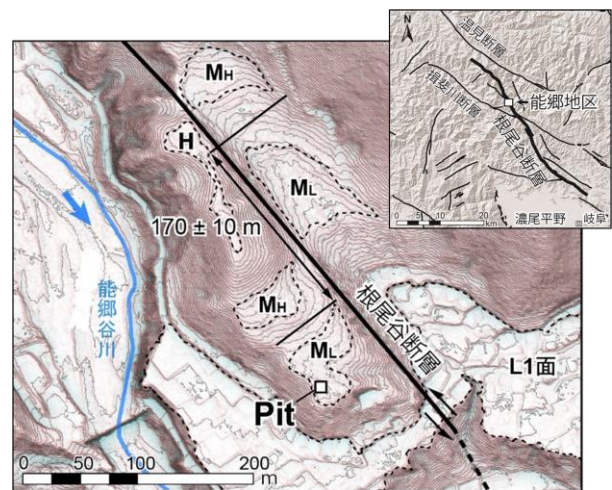


図-2 根尾谷断層北部の能郷地区で確認された段丘崖の左横ずれ<sup>1)2)</sup>, およびピット掘削地点

#### (2) ピット掘削調査

次に, 選定した地点において深さ約2 mのピットを人力で掘削した. 掘削に際しては, 段丘構成層全体の密度を見積もるためにモッコとクレーンスケールを用いてすべての掘削土砂の重量を測定しながら作業を進めた. また, その体積を見積もるため, 掘削前後にはSiM測量のための写真撮影を行った. 掘削完了後, ピット壁面に露出した段丘構成層の5層準から粒径10 mm程度以下の基質部分を $^{10}\text{Be}$ 濃度測定用試料として採取した. また, ピット堆積物試料の継承核種濃度と比較する目的として, 能郷谷川 (図-2) の現河床においても細粒砂～細礫サイズの堆積物を採取した. 一方, 風成被覆層の密度を見積もるため, 100 ml採土管を用いてピット壁面から複数の風成堆積物試料を採取した. さらに, ピット掘削地点の積雪深を見積もるため, 雪尺およびタイムラプスカメラを用いて2022～2023年の冬期の日々の積雪深を観測した.

#### (3) 試料分析

ピットおよび現河床で採取した $^{10}\text{Be}$ 濃度測定用試料については以下の処理を実施した.

$^{10}\text{Be}$ 濃度は粒径に依存することが知られているため<sup>8)</sup>, はじめに, ふるい分けによって各試料の粒度分析を行い, すべての試料から必要な石英量 (概ね20 g以上) の回収が見込める粒度帯を決定した. 決定した粒度帯の試料について, ネオジウム磁石による磁性鉱物粒子の除去, HCl処理, 重液分離, およびHF・HNO<sub>3</sub>の混酸処理によって高純度の石英のみを抽出した. 次に, 得られた石英試料に濃度既知のBeキャリアを添加して溶解した後, イオン交換によってBe(OH)<sub>2</sub>の形でBeを単離, 炉で高温焼成してBeOへ酸化させ, 測定用のカソードにプ

レスした。最後に、加速器質量分析によって $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ の同位体比を測定し、この同位体比、添加したキャリア量、および石英の重量に基づいて各試料の $^{10}\text{Be}$ の濃度 $C$  (atoms/g) を求めた。

以上の処理のうち、HCl処理、HF・HNO<sub>3</sub>の混酸処理、および加速器質量分析については東京大学タンデム加速器研究施設、Beの単離実験については京都大学防災研究所、それ以外の処理については中央大学理工学部で実施した。

#### (4) 深度断面モデリング

測定された各ピット堆積物試料の $^{10}\text{Be}$ 濃度 $C$ の深度変化に対して、離水年代 $t$  (yr) と継承核種濃度 $C_0$  (atoms/g) を説明変数とした (1) 式を用いることで、 $C$ の測定値と理論値の残差平方和が最小となる $t$ と $C_0$ を決定した。

(1) 式の各定数の決定においては、高緯度海水準の基準 $^{10}\text{Be}$ 生成率として世界平均値 ( $4.06 \pm 0.23$  atoms/g/yr) , 緯度・標高によるスケールアップスキームとしてはLifton et al.<sup>9)</sup>、古地磁気変化記録としてはLifton<sup>10)</sup>を用い、地形・積雪遮蔽補正を行ったうえで、現地における $^{10}\text{Be}$ 生成率 $P_0$ を求めた。また、 $A_{bi}$ および $A_{li}$ については地層の含水率を考慮した補正を行った。負の年代や継承核種濃度をもつことはあり得ないため、モデリングの際には $t$ および $C_0$ がともに非負数となる制約を与えた上で、各変数に対して正規分布に従う誤差を与えたモンテカルロシミュレーションを10000回行った。

### 5. 結果

地形判読および現地予察調査に基づき、断層隆起側の $M_L$ 面の南端に近い地点をピット掘削地点として選定し (図-2のPit) , この場所において深さ約2.0 m, 幅約2.0 m, 奥行き約1.2 mのピットを掘削した。段丘構成層の総重量は3501 kg, SfM測量から算出した体積は1.70 m<sup>3</sup>, 段丘構成層の密度は2.03 g/cm<sup>3</sup>であった。ピット壁面には、厚さ約60 cmの黒褐〜黄褐色シルト層 (風成被覆層) の下に径1 mを超える花崗閃緑岩の巨礫を含む河成礫層 (段丘構成層) が露出し、礫層中の深度70 cmから150 cmまでの5層準からそれぞれ3.0~4.1 kgの基質部分を $^{10}\text{Be}$ 濃度測定用試料として採取した (図-3a, 青枠) 。また、風成被覆層の6層準で採取した試料の平均密度は1.15 g/cm<sup>3</sup>と測定され、ピット掘削地点における $^{10}\text{Be}$ 生成率 $P_0$ の地形および積雪補正係数はそれぞれ、0.9934および0.9929と決定された。

$^{10}\text{Be}$ 濃度測定用の各試料の粒度分析に基づき、使用する粒度帯を0.25~4 mmに決定し、前処理および同位体比測定に供した。加速器質量分析の結果、ピットの各深度より採取した堆積物試料からは $1.92 \times 10^5 \sim 0.59 \times 10^5$  atoms/gの範囲で深度方向に滑らかに減衰する $^{10}\text{Be}$ 濃度が得

られた (図-3b) 。現河床堆積物試料の $^{10}\text{Be}$ 濃度は $8072 \pm 927$  atoms/gと非常に小さな値となった。

(1) 式の各定数と $^{10}\text{Be}$ 濃度の測定値に基づいた深度断面モデリングおよびモンテカルロシミュレーションを行った結果、離水年代 $t = 68.3 \pm 4.7$  kyrの値が得られた。また、継承核種濃度 $C_0$ の平均値は55 atoms/gと極めて小さく、特に10000回のうち9833回は $C_0 = 0$  atoms/gの値となった。

### 6. 考察

#### (1) 深度断面モデリング結果の再検討

モンテカルロシミュレーションでは、98%以上のモデリングで継承核種濃度 $C_0 = 0$  atoms/gが最適値として得られたが、堆積物中に継承核種が全く含まれていないことは現実にはあり得ない。実際に、現河床の堆積物からは $8072 \pm 927$  atoms/gの $^{10}\text{Be}$ 濃度が得られている。ただし、段丘構成層には現河床の堆積物と比較して明らかに巨礫が多く含まれることから、段丘構成層堆積時には上流からの土砂供給が盛んで、現在よりも流域の侵食速度が大きかったと考えられる。そのため、段丘堆積物が現在の位置に定着するまでの間に宇宙線に晒される時間は短くなり、 $C_0$ は現河床堆積物の $^{10}\text{Be}$ 濃度よりも小さかった可能性が高い。そこで、 $C_0$ の値を0~8072 atoms/gの範囲でランダムに与えたモンテカルロシミュレーションを再度10000回行った。結果、 $M_L$ 面の離水年代として $66.3 \pm 4.6$  kyrの値が得られた (図-4) 。

本研究で得られた $M_L$ 面の離水年代は、ちょうど海洋酸素同位体ステージ (MIS) 4の亜氷期 (71~57 kyr) に相当する。このことは、上流域では氷期に段丘が形成されるという一般的な理解と整合的であり、能郷地区

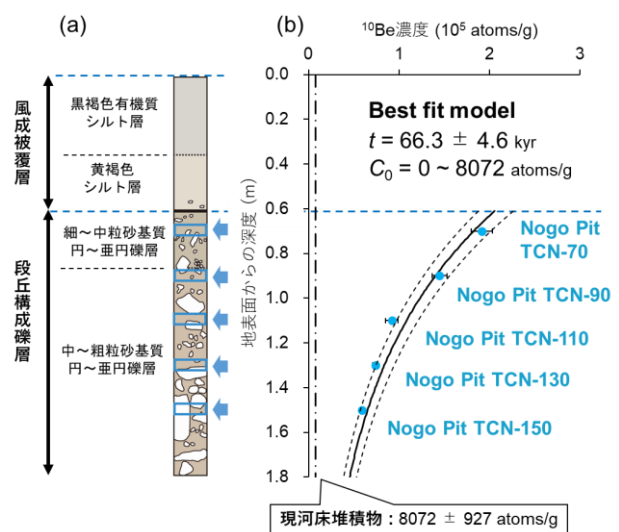


図-3 (a) ピット壁面の柱状図

(b)  $^{10}\text{Be}$ 濃度測定結果 (深度- $^{10}\text{Be}$ 濃度断面図)

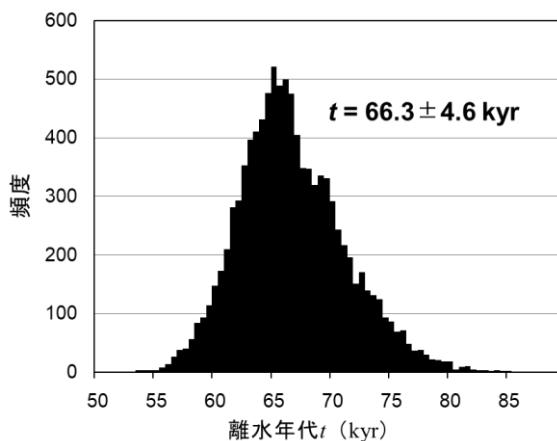


図-4 継承核種濃度  $C_0=0\sim 8072\text{atoms/g}$  のモンテカルロシミュレーションによる離水年代  $t$  の頻度分布

の  $M_L$  面が MIS 4 の亜氷期から MIS 3 の亜間氷期 (57~29 kyr) に向けての温暖化および降水量の増加に伴って離水したことが示唆される。

#### (2) 開析谷の横ずれに基づく平均変位速度の過小評価

本研究で得られた  $M_L$  面の離水年代 ( $66.3 \pm 4.6$  kyr) および  $M_H$ - $M_L$  面間の段丘崖の横ずれ量 ( $170 \pm 10$  m<sup>1)</sup> より、能郷地区における根尾谷断層の左横ずれ平均変位速度は  $2.56 \pm 0.23$  m/kyr と推定される。一方、能郷地区の近傍 (南東約 2.0 km) に位置する天神堂地区では、中位段丘面の開析谷の横ずれに基づいて平均変位速度が  $1.23 + 0.27/-0.23$  m/kyr と推定されており<sup>3)</sup>、本研究で得られた値はその倍以上である。わずか 2 km の距離で平均変位速度が半減するとは考えにくいので、天神堂地区で求められた平均変位速度は大きく過小評価されている可能性が高い。天神堂地区における平均変位速度が能郷地区の値 ( $2.56 \pm 0.23$  m/kyr) と変わらないと仮定すると、中位段丘面では開析谷の形成に  $35.1 + 5.7/-5.5$  kyr もの時間がかかっていることになる。

本研究により、少なくとも根尾谷断層においては、開析谷に基づく平均変位速度が過小評価されている可能性が高いことが明らかとなった。国内には、根尾谷断層以外にも、開析谷に基づいて平均変位速度が推定されている横ずれ活断層が多く存在するため、今後はこのような活断層を対象として過小評価の可能性を検証してゆく必要がある。その際には、根尾谷断層の事例のように、航空レーザー測量データを用いた詳細な地形判読によって新たに段丘崖の横ずれ地形が発見されることが望ましいが、そのような地形がそもそも存在しない活断層が少なからずあることが想定される。したがって、将来的には、開析谷の形成モデルを構築し、開析にかかる時間を見積もった上で平均変位速度

を推定できる手法の開発が求められる。また、段丘崖、開析谷のいずれの地形を用いても段丘面の離水年代決定は必須であるため、火山灰分析や放射性炭素年代測定による年代決定が困難な場合には、宇宙線生成核種年代測定法の適用も望まれる。

**謝辞:** 本研究で実施した試料処理および加速器質量分析の際には、京都大学防災研究所の松四雄騎教授、森川亜紀子氏、東京大学タンデム加速器研究施設の松崎浩之教授に大変お世話になった。

#### 参考文献

- 1) 田所龍二: 開析谷形成時間を考慮した横ずれ活断層の平均変位速度推定とその検証—根尾谷断層北部を例として—, 千葉大学大学院理学研究科, 修士論文, 2021MS.
- 2) Kaneda, H. and Chiba, T.: Stereopaired Morphometric Protection Index Red Relief Image Maps (Stereo MPI-RRIMs): Effective Visualization of High-Resolution Digital Elevation Models for Interpreting and Mapping Small Tectonic Geomorphic Features, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 109-1, 99-109, 2019.
- 3) Kaneda, H. and Okada, A.: Long-Term Seismic Behavior of a Fault Involved in a Multiple-Fault Rupture: Insights from Tectonic Geomorphology along the Neodani Fault, Central Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98-5, 2170-2190, 2008.
- 4) Anderson, R.S., J.L. Repka, and G.S. Dick.: Explicit treatment of inheritance in dating depositional surfaces using in situ <sup>10</sup>Be and <sup>26</sup>Al, *Geology*, 24, 47-51, 1996.
- 5) 松四雄騎: 鉍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*, 72-1, 11-19, 2023.
- 6) Braucher, R., S. Merchel, J. Borgomano, and D.L. Bourlès: Production of cosmogenic radionuclides at great depth: A multi element approach, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 309, 1-9, 2011.
- 7) 高橋大地: 岐阜県、能郷付近における根尾谷断層北部の断層変位地形, 千葉大学理学部, 卒業論文, 2017MS.
- 8) M. Schaller, F. von Blanckenburg, N. Hovius, P.W. Kubik: Large-scale erosion rates from in situ-produced cosmogenic nuclides in European river sediments, *Earth and Planetary Science Letters*, 188, 441-558, 2001.
- 9) Lifton, N., T. Sato, and T.J. Dunai: Scaling in situ cosmogenic nuclide production rates using analytical approximations to atmospheric cosmic-ray fluxes, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 386, 149-160, 2014.
- 10) Lifton, N.: Implications of two Holocene time-dependent geomagnetic models for cosmogenic nuclide production rate scaling, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 433, 257-268, 2016.