

紀伊半島・十津川上流部の下刻速度 —宇宙線生成核種を用いた蛇行切断の年代決定からのアプローチ—

松四雄騎・千木良雅弘・平石成美⁽¹⁾・松崎浩之⁽²⁾

(1) 公益財団法人 深田地質研究所

(2) 東京大学 大学院工学系研究科 原子力国際専攻 タンデム加速器研究施設

要 旨

穿入蛇行する山地河川において、蛇行切断によって形成され高位に取り残された旧河道に存在する礫を対象として、宇宙線生成核種の加速器質量分析によって地表面露出年代を決定し、河川の下刻速度を求める方法論を提案した。この手法を、紀伊半島・十津川最上流部の天ノ川に適用したところ、現河床から比高136 mに存在する旧河道中に存在しているチャートおよび花崗岩の礫の露出年代（すなわち蛇行切断の発生による礫の定置年代）は、31 kaと推定され、天ノ川の下刻速度は $4.4 \pm 0.3 \text{ mm yr}^{-1}$ と見積もられた。この値は本地域において従来想定されていた隆起速度よりも大きく、紀伊半島中央部の山地河川において急速な下刻が進行していることを示している。

キーワード： 穿入蛇行，蛇行切断，下刻速度，宇宙線生成核種，露出年代，地形発達

1. はじめに

山間地を穿入蛇行しながら流下する河川は、下刻および側刻によって周囲の斜面の安定性に大きな影響を及ぼす。事実、岩盤の崩落を含む大規模な崩壊は、穿入蛇行の攻撃斜面に多く発生することや（例えば、平野ほか，1984），大規模な重力変形のみられる斜面には、しばしばその下部に、河川の下刻の影響を受けたとみられる遷急線が発達していることが指摘されている（例えば、平石・千木良，2011）。このことは、山間地における土砂災害の防災・減災を視野に入れた斜面の安定性評価には、河川の下刻・側刻史を含む長期的な時間スケールでの流域発達史の理解が必要であることを意味している。

河川の下刻速度を推定するには、絶対時間軸の導入が必要不可欠であり、年代測定のための道具立てが必要となる。従来、河川の下流部においては、堆積段丘の編年から地形の発達史を復元することは一般的に行われてきた。しかし、山間地を流れる河川上流部においては、侵食段丘など、手がかりとなる地形が年代試料に乏しい岩盤主体のものであることなどから、定量的な議論が難しい状況にあった。本研究では、穿入蛇行に特有の地形に着眼し、また、

地表面近傍の鉱物への宇宙線の照射によって生成・蓄積する同位体である宇宙線生成核種を用いた年代法を援用することで、従来困難であった山間地の河川の下刻速度の復元を試みる。

河川の側刻の進行によって、蛇行切断（穿入蛇行の頸部の短絡）が発生すると、蛇行核の周囲には放棄された水流のない河道が残される。この旧河道には、かつて河流によって運搬されていた礫や、切断後の洪水によって供給された細粒堆積物が存在する。これらの遺物は、本流の下刻に伴って、高位に取り残されることになる。このように蛇行切断に伴って高位に取り残された旧河道を、ここでは放棄河道と呼ぶことにする。放棄河道中の堆積物の定置年代、すなわち蛇行切断の発生年代を決定することができれば、その放棄河道と現河床との比高から本流河川の下刻速度を推定することが可能となる。

旧河道の堆積物中に含まれるケイ酸塩鉱物中には、定置以降に宇宙線の照射を受けて生成した核種が蓄積しているはずである。中でも石英中に存在する ^{10}Be および ^{26}Al は、その年間生成率が緯度と標高に基づいて計算可能であるため（Stone, 2000），石英中の存在量がわかれば、その試料が宇宙線の被爆を受けた期間、すなわち地表面露出年代が算出できる。

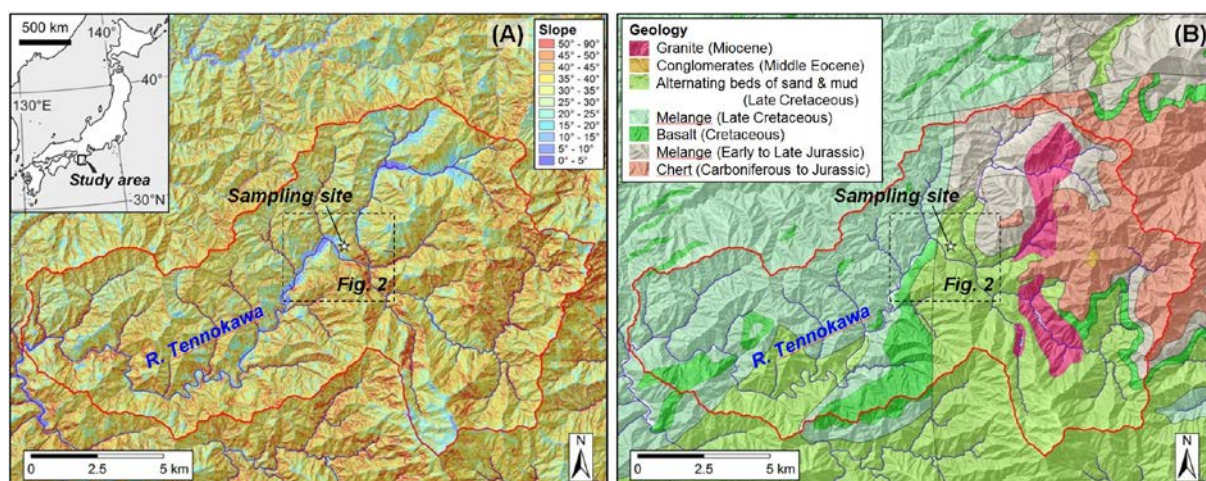


Fig. 1. Topography and slope distribution map (A) and geological map (B) of the Tennokawa watershed.

本研究では、紀伊半島・十津川最上流部に位置する天ノ川を対象に、蛇行切断によって形成された放棄河道に残された礫の露出年代を、宇宙線生成核種を用いて決定した。そして、放棄河道と現河床との比高から、天ノ川の下刻速度を算出した。

2. 調査地域およびサンプリング

調査対象は、紀伊半島の中央部に位置する十津川の上流部である天ノ川である (Fig. 1A)。天ノ川は主に、付加体堆積岩を基盤とする地域を流下するが、最上流部にはジュラ紀のチャートを基盤とする流域を持ち、また、中新世の花崗岩の貫入岩体を基盤とする地域を通過している (Fig. 1B)。

試料採取の対象となった領域の拡大図をFig. 2Aに

示す。我々は図中に星印で示した地点に蛇行核を見出し、放棄河道にあたる地点で、チャートおよび花崗岩の礫を発見した (Fig. 3)。放棄河道の地点を構成する基盤岩は、砂岩および泥岩を主体とする付加体堆積岩であり、チャートおよび花崗岩の礫は、上流に存在するそれぞれの岩体 (Fig. 1B) から供給され、運搬されてきたものであろう。このことは、この地点が確実に、かつて本流の河床であったことを意味している。

旧河道にあたる地表に散在している直径3-10 cmのチャートの円礫 (ID: Ap-1.1) および、長径約50 cmの花崗岩の垂角礫の頂部の厚み約4 cm (ID: Ap-2) の岩片を、年代測定試料として採取した (Fig. 3)。試料の採取地点は標高739 mであり、現河床との比高は136 mである。

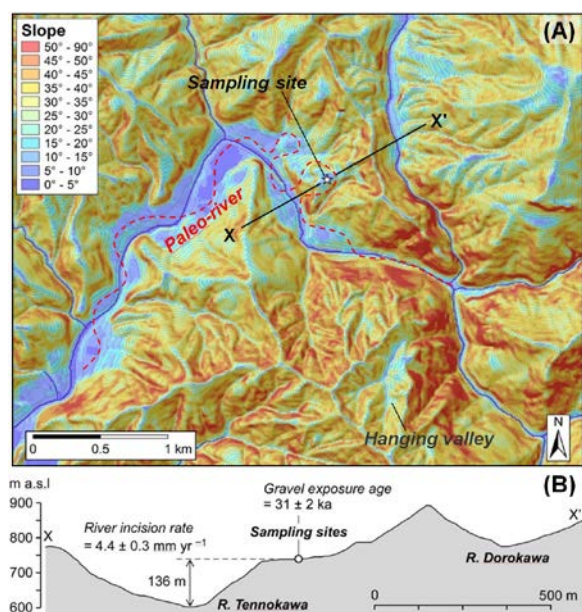


Fig. 2. Topography around the sampling site (A) and cross-sectional profile of the incised river (B).

3. 分析方法

試料を粉砕したのち、径0.25-1 mmに整粒し、Kohl and Nishiizumi (1992) に基づいた化学処理によって石英を抽出した。まず、試料約150 gに1.8 Lの18% HClを加え、80 °Cの恒温水槽内で12 hの超音波振動を与え、炭酸塩および酸可溶鉱物を除去した。次に1% HF-HNO₃混酸中に試料を入れ、95 °Cの恒温水槽内で9 hの超音波振動を与える処理を4サイクル繰り返して、石英以外のケイ酸塩鉱物を完全に溶解させ、溶け残った石英粒子を分析の対象試料とした。

次に、乾燥させた石英粒子を秤量し、安定Be担体を2.5 μg加えた。この試料を、HF、HNO₃およびHClO₄を用いて完全に溶解させた後、イオン交換分離によってBeおよびAlをそれぞれ抽出した。抽出したBeおよびAlは、炉で酸化物に焼成して、加速器質量分析用のターゲットホルダーにプレスした。石英粒子中に含まれる天然の安定Alの濃度は、溶解試料の一部

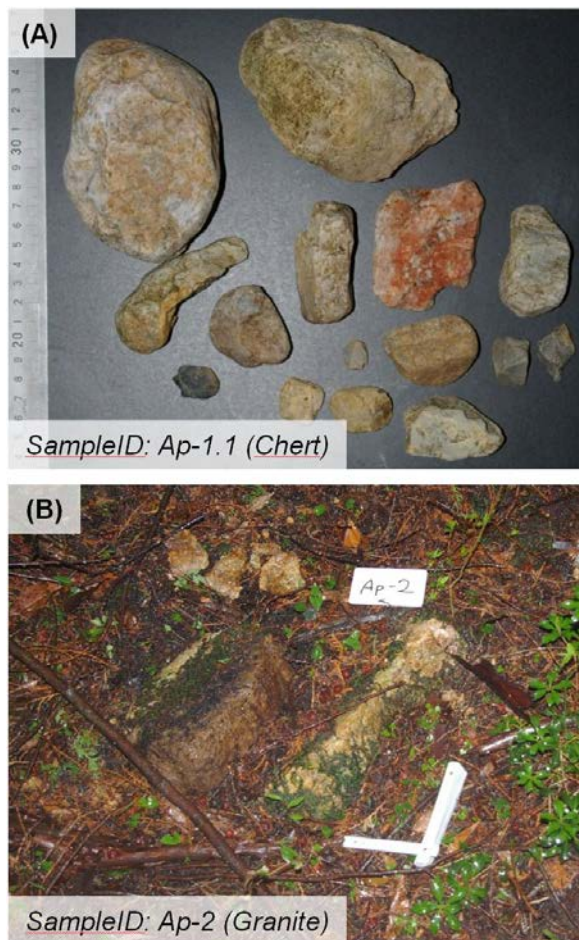


Fig. 3. Chert (A) and granite (B) gravel samples for terrestrial cosmogenic nuclide analysis.

を分取した溶液のフレイム原子吸光分析によって定量した。

^{10}Be -, ^{26}Al の加速器質量分析 (AMS: Accelerator Mass Spectrometry) は、東京大学大学院工学系研究科 原子力国際専攻のタンデム加速器研究施設 (MALT: Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator, The University of Tokyo) (Matsuzaki et al., 2007)において行った。計測した試料の同位体比 ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ および $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$)には、標準試料の同位体比 ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be} = 2.71 \times 10^{-11}$, Nishiizumi et al., 2007; $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 4.69 \times 10^{-12}$, Nishiizumi et al., 2003) とケミカルブランクを用いた標準補正およびバックグラウ

ンド補正を施した。安定同位体量と同位体比および化学処理に使用した試料重量から石英1 gあたりの核種量を算出した。

4. 年代測定結果および考察

Table 1に年代測定結果を示す。Ap-1.1 (チャート礫) およびAp-2 (花崗岩礫) の ^{10}Be 年代は極めて良く一致し、いずれも31 kaの年代を示した。一方、 ^{26}Al 年代はそれぞれ、33 kaおよび23 kaであった。精度および ^{10}Be との整合性を考えると、 ^{26}Al の分析に不確かさが大きく、特にAp-2の ^{26}Al の測定において何らかの問題がある可能性がある。Ap-2の ^{26}Al 年代が過小評価された原因は、現在のところ不明であるが安定Alの原子吸光分析における共存元素干渉が疑われるため、再分析を検討中である。

より高精度な分析ができた ^{10}Be の値から、蛇行切断によってこの河道が放棄された年代は約31 kaであると推定される。放棄河道と現河床との比高が136 mであることから、この地点における蛇行切断後の天ノ川の下刻速度は、 $4.4 \pm 0.3 \text{ mm yr}^{-1}$ と計算される (Fig. 2B)。ただし、この速度は等速での下刻を仮定したものであり、遷急点の後退を伴う実際の河川の下刻過程では、遡上する遷急点の上流と下流で、その速度は変化していた可能性がある。

紀伊半島の隆起速度については、十分なデータがないが、吉山・柳田 (1995) は、十津川を含む熊野川水系の東に位置する宮川中流域において、氷期-間氷期サイクルに伴って形成される河成面の比高を求めている。それによれば、酸素同位体ステージ (MIS: Marine Isotope Stage) 2 (約20 ka) とMIS 6 (約140 ka) にそれぞれ形成された段丘面の比高は10-25 mであり、MIS 5e (約125 ka) に形成された埋没谷底と現在の河床との比高は12-20 mである。ここから宮川中流域の隆起速度を求めると、 $0.1\text{-}0.2 \text{ mm yr}^{-1}$ の値が得られる。

宮川では上流 (紀伊半島中央に向かう西側) ほど時代を異にする河成面の比高が大きいこと、また紀伊山地の高度分布からみた隆起像として曲隆が強く示唆されることなどから、半島の中心に近い天ノ川の隆起速度は、宮川中流域のそれよりも大きいもの

Table 1. Results of cosmogenic nuclide measurements and exposure dating

ID	Rock type	Quartz wt. (g)	^9Be carrier (μg)	^{27}Al * (ppmw)	Nuclide conc. (atoms g^{-1})		Exposure age (ka)	
					^{10}Be $\times 10^5$	^{26}Al $\times 10^6$	From ^{10}Be	From ^{26}Al
Ap-1.1	Chert	7.7522	246.5 ± 1.2	592 ± 40	2.23 ± 0.09	1.58 ± 0.15	30.9 ± 2.4	32.8 ± 3.9
Ap-2	Granite	20.3735	247.3 ± 1.2	281 ± 14	2.22 ± 0.07	1.12 ± 0.09	30.5 ± 2.3	22.9 ± 2.4

*Concentration in the purified quartz grains.

と推察される。本研究において得られた天ノ川の下刻速度 (4.4 mm yr^{-1}) は、宮川の20倍以上の値を示している。これが天ノ川流域における速い隆起に対する河川の応答を示すものか、あるいは河川の非平衡的な下刻の振る舞いを示すものであるかについては、今後の研究が俟たれるところである。

紀伊半島中央部では、河川における遷急点および谷壁斜面上の傾斜変換線（遷急線）の存在が指摘されている（平石・千木良，2011）。このことは、現在の紀伊半島中央部の河川が、動的平衡の状態からはずれ、水系網における侵食前線の伝播を反映して、急速な下刻によって活発に山体を開析してゆく途上にあることを強く示唆している。天ノ川流域では、支谷の河床縦断形に、明瞭な遷急点がみられる場合と、遷急点がみられず、本流の下刻による侵食基準面の低下への従順化が完了しているようにみえる場合とが、混在していることが明らかとなっている（平石ほか，2012）。これは、水系網における遷急点の移動や河床縦断系の発達に、基盤地質の影響があることを示唆している。本研究によって、本流の下刻速度が明らかとなったため、支谷における河床縦断形の変遷についても定量的に扱うことが可能となった。今後、各支谷において、河床を構成する基盤岩の物性（特に強度）と、河床縦断形の侵食基準面低下への応答特性との定量的関係を議論したいと考えている。

5. おわりに

宇宙線生成核種の定量による地表面露出年代測定を用いて、紀伊半島・十津川最上流部の天ノ川の下刻速度を求めた。過去の蛇行切断によって形成された蛇行核を取り巻く旧河道において、チャートおよび花崗岩の礫を採取し、 ^{10}Be および ^{26}Al を定量して露出年代を求めたところ、蛇行切断の発生した年代は約31 ka (^{10}Be に基づく年代)と推定された。旧河道と現河床との比高は136 mであり、天ノ川の下刻速度は $4.4 \pm 0.3 \text{ mm yr}^{-1}$ と見積もられた。この下刻速度は、紀伊半島中央部の最近の隆起速度が、従来想定されてきたよりもはるかに大きく、河川がそれに追従して河床高度を下げているか、あるいは山地河川が、隆起に対して非平衡な状態で急速に下刻していることを示す。

天ノ川および十津川では、1889年および2011年に河川側壁斜面の大規模崩壊の群発による災害が発生している。大規模崩壊（特にその源頭部）の分布は、河川の下刻による開析領域の上端の分布と整合的であることが指摘されている（平石ほか，2012）。すなわち、いわゆる深層崩壊と呼ばれるような大規模

な岩盤崩落や、その前兆としての重力変形は、山地河川の下刻に対する斜面の応答の現れとして捉えることができよう。本研究により、山地河川の下刻史を定量的に論じるための方法論を提示することができた。今後、十津川を含む熊野川全域で河川の下刻速度の分布を数量的に把握し、河床縦断形や斜面形の解析と合わせて、不安定領域の絞込みを行ってゆく予定である。その上で地質構造・地形発達史の深い理解に立脚した安全・安心な土地利用を実践し、防災・減災に役立ててゆく必要がある。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金(23654172; 代表: 千木良雅弘; 23710208; 代表: 松四雄騎) および国土交通省河川砂防技術研究開発公募砂防技術分野「深層崩壊の発生危険斜面の地質的抽出手法の検討」(代表: 千木良雅弘) の助成を受けたものである。

参考文献

- 平石成美・千木良雅弘 (2011) : 紀伊山地中央部における谷中谷の形成と山体重力変形の発生, 地形, Vol. 32, No. 4, pp. 389-409.
- 平石成美・千木良雅弘・松四雄騎 (2012) : 紀伊山地における深層崩壊の発生場 —地形発達過程からの検討—, 京都大学防災研究所 特定研究集会「深層崩壊の実態, 予測, 対応」講演要旨集, pp.53-55.
- 平野昌繁・諏訪 浩・石井孝行・藤田 崇・後町幸雄 (1984) : 1889 年8月豪雨による十津川災害の再検討—とくに大規模崩壊の地質構造規制—, 京大防災研年報, 27, B-1, 369-386.
- 吉山 昭, 柳田 誠 (1995) : 河成地形面の比高分布からみた地殻変動, 地学雑誌, Vol. 104, No. 6, pp. 809-826.
- Kohl, C. P. and Nishiizumi, K. (1992): Chemical isolation of quartz for measurement of in-situ-produced cosmogenic nuclides: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 56, 3583-3587.
- Matsuzaki, H., Nakano, C., Tsuchiya, Y.S., Kato, K., Maejima, Y., Miyairi, Y., Wakasa, S. and Aze, T. Multi-nuclide AMS performances at MALT. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* Vol. 259 (2007) 36-40
- Nishiizumi, K., (2004): Preparation of ^{26}Al AMS Standards, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* Vol. 223-224, pp. 388-392.
- Nishiizumi, K., Imamura, M., Caffee, M. W., Southon, J. R., Finkel, R. C. and McAninch, J. (2007): Absolute Calibration of ^{10}Be AMS Standards, *Nucl. Instrum.*

**Incision Rate of Uppermost Reaches in the Totsukawa River, Kii Peninsula Japan:
an Approach from Exposure Dating of Abandoned Channels using Terrestrial Cosmogenic Nuclides**

Yuki MATSUSHI, Masahiro CHIGIRA, Narumi HIRAISHI⁽¹⁾ and Hiroyuki MATSUZAKI⁽²⁾

(1) Fukada Geological Institute, Japan

(2) Micro Analysis Laboratory, Tandem Accelerator, The University of Tokyo

Synopsis

This report presents initial results of cosmogenic nuclide exposure dating for fossil fluvial deposits to estimate river incision rate in an uplifting mountainous terrain. We collected samples of chert and granite gravels in an abandoned channel left ~136 m above the present river bed after meander cutoff in the Tennokawa River, central Kii mountains Japan. ¹⁰Be exposure ages of these two types of gravels show an excellent agreement at ~31 ka as timing of gravel settlement on the abandoned channel. Incision rate of the main stream is thus calculated to be 4.4 ± 0.3 mm yr⁻¹. This result implies 1) a much faster uplift rate than that previously thought in this orogen or 2) unequilibrium state of the rapid river incision against uplifting. Valley-side hillslopes in this region seem to destabilize progressively through this rapid dissection by the incised meandering river.

Keywords: incised meander, meander cutoff, incision rate, terrestrial cosmogenic nuclides, exposure dating, landscape evolution