

## 山地斜面における人為的な侵食加速の定量的評価と履歴復元：森林資源の収奪に対する応答としての土層の存続性変化と流域環境の遷移

太田凌嘉

### 1. 序論

暖湿潤気候下の山地斜面の大部分は、基盤岩石の風化生成物であるレゴリス（土層および風化岩）に被覆され、地上には、それを生存基盤とする森林生態系が成立している。樹冠頂部から岩盤内の風化前線に至るまでの領域は、地圏、水圏、気圏、生物圏が交わる地表近傍境界域（Critical zone）と呼ばれ、地形変化と水循環および生物活動の場となっている。流域水文システムの恒常性は、地表近傍境界域を構成する要素の共存によって維持されており、例えば、植生が失われると、その生存基盤となっていたレゴリスもまた侵食によって損失してゆく。近年広く認識されているように、人間活動は、人口の増加と文明の発展によって地球環境に大きな影響を与えつつあり、山地流域の環境変遷においては植生の改変を介して侵食の大幅加速をもたらした。植生が地表近傍境界域において発揮している種々の効果は、土層の存続性、すなわち斜面上に土層が存続できる時間スケールとその厚みの上限値を規定していると考えられる。また、人為影響による流域環境の遷移は、それまでとは異なる機構と過程そして周期で斜面構成物質が削剥されるようになったことを反映していると捉えることができる。流域における人為影響の履歴は、人為影響に伴う侵食加速に起因して斜面から生産された土砂が下流域に堆積したレガシーセディメントとしてアーカイブされると期待される。

本研究の目的は、人間による森林植生の消失が流域斜面の土層と植生の被覆に対して与えた影響を定量的に評価し、森林被覆地と裸地という対照的な流域環境がなぜ成立したのかを、同位体濃度の時空間変化あるいは森林植生の効果や土層の性状といった多面的な証拠に基づいて解明することである。この目的を達成するために、人為影響を受けて土層と植生が消失した流域と人為影響を免れて天然の状態に近い土層および植生の状態が保存されている流域が隣接している滋賀県・田上山地を研究対象とした。本研究では、宇宙線生成核種  $^{10}\text{Be}$  による土砂生産の定量化およびその履歴復元を行い、田上山地では土層の完全な喪失が過去 300 年間に劇的に進行したことを明らかにした。さらに、土層および植生の被覆が対照的な状態にある流域における詳細な調査に基づき、非粘着質の風化生成物をつくる花崗岩類のような地質条件の場では、植生が再生不能となるほどの人為影響が加わると流域環境が元の状態へと戻ることが難しくなることを論証する。

## 2. 宇宙線生成核種を用いた削剥の定量的評価と環境変遷の復元に関する方法論

山地流域の地表は、常に宇宙線の照射を受けており、地表近傍に存在する石英粒子の  $^{16}\text{O}$  の原子核を主な反応標的として  $^{10}\text{Be}$  が生成する。斜面から河道へと供給される石英粒子中には、宇宙線が核種を顕著に生成させる深度（地表面下~2 m 程度）までの斜面構成物質が削剥により除去されるまでの間に蓄積した  $^{10}\text{Be}$  が存在する。流域はその内部の斜面ごとに異なる削剥速度で土砂を生産しており、流域出口における溪流堆砂は、運搬される過程において様々な場所から多様な速度で除去されたものが混合している。核種蓄積の時間スケールにおいて流域内で生起する非定常な過程が平均化されるため、溪流堆砂中の  $^{10}\text{Be}$  濃度は、試料採集地点より上流域での空間的に平均化された長期的削剥速度を反映する。溪流堆砂中の  $^{10}\text{Be}$  濃度  $\bar{C}$  (atoms g $^{-1}$ ) は、

$$\bar{C} = \frac{\bar{P}_0}{\bar{D}} \cdot (p_n A_n + p_{\mu s} A_{\mu s} + p_{\mu f} A_{\mu f}) \quad (1)$$

と書ける。ここで、 $\bar{P}_0$  (atoms g $^{-1}$  yr $^{-1}$ ) は対象流域の地表面における平均核種生成率、 $\bar{D}$  (g m $^{-2}$  yr $^{-1}$ ) は流域の空間平均削剥速度、 $p_n$ ,  $p_{\mu s}$ ,  $p_{\mu f}$  および  $A_n$ ,  $A_{\mu s}$ ,  $A_{\mu f}$  (g m $^{-2}$ ) はそれぞれ3つの核種生成の機構に対応した地表での寄与率および地表下での粒子の減衰長であり、添え字は  $n$  が高速中性子による核破砕反応、 $\mu s$  が負電荷低速ミューオンの原子核捕獲、 $\mu f$  が高速ミューオンによる光核反応を表す。

従来、風化による土粒子の生産と侵食が長期的にバランスしていると仮定できる保存流域で、堆積物中の同位体の濃度が動的平衡になっているものとして、式(1)よりバックグラウンド（またはベンチマーク）の削剥速度が求められてきた。一方、人為影響を受けて土層が完全に損失した履歴を持つ荒廃流域の場合、単純に溪流堆砂中の  $^{10}\text{Be}$  濃度を削剥速度に換算することはできない。ここでいう「保存流域」とは、人為影響による環境遷移を免れて流域斜面が土層に覆われた状態が維持されている流域をさし、「荒廃流域」とは、過去に少なくとも一度は甚大な人為影響を受けて流域斜面の植生と土層の被覆が完全に取り除かれ、風化基盤岩が露出した状態へと荒廃したところのある流域（いわゆるハゲ山）をさす。土層が削られている限り、一時的な侵食加速が溪流堆砂中の  $^{10}\text{Be}$  濃度に与える影響は小さいことが知られているが、それまで土層に遮蔽されていた風化基盤岩が直接削剥される状態が維持されると、 $^{10}\text{Be}$  濃度の小さな粒子が供給されるようになる。

保存流域と荒廃流域から得られた溪流堆砂中の  $^{10}\text{Be}$  濃度を比較することで、荒廃流域での環境遷移の過程で斜面上から削剥された土砂の総量を推定できるという新しいコンセプトをここで提案する。風化基盤岩における石英粒子中の  $^{10}\text{Be}$  濃度は、宇宙線フラックスが深度方向に減衰することを反映して、指数関数的に減少する。局所的な削剥速度が、バックグラウンドの削剥速度と同等である代表的な斜面では、土層とサブロライトの境界深度より下層の任意深度  $x$  (m) にある基盤岩中の  $^{10}\text{Be}$  濃度  $C_b$  (atoms g $^{-1}$ ) は、次のように

あらわすことができる。

$$C_b = \frac{P_0}{D_{BG}} \cdot [ (p_n \Lambda_n \cdot e^{-\frac{\rho x}{\Lambda_n}}) + (p_{\mu s} \Lambda_{\mu s} \cdot e^{-\frac{\rho x}{\Lambda_{\mu s}}}) + (p_{\mu f} \Lambda_{\mu f} \cdot e^{-\frac{\rho x}{\Lambda_{\mu f}}}) ] \quad (2)$$

ここで、 $D_{BG}$  ( $\text{g m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ ) はバックグラウンドの削剥速度、 $\rho$  ( $\text{g m}^{-3}$ ) は地形構成物質のかさ密度である。荒廃流域の溪流堆砂中の $^{10}\text{Be}$ 濃度 $C_{\text{dev}}$ が、式(2)の $C_b$ に等しく、人為影響を受ける以前の土層および植生の被覆状態での流域の削剥速度が $D_{BG}$ と同等であったと仮定することで、流域の状態遷移の過程で斜面から削剥された土砂の空間平均総量(以下、総削剥土砂量) $\rho x$  ( $\text{g m}^{-2}$ )を求めることができる。 $D_{BG}$ については、同一の地質・気候条件下にあり、荒廃流域の近傍に位置する保存流域の削剥速度の分析から求めることが望ましい。式(2)は $x$ について解析的に解くことはできないが、 $\rho x$ は逆解析によって特定できる。人為的な環境攪乱が生起する時間スケール( $<10^2 \text{yr}$ )は、定常的な侵食を受けている斜面での $^{10}\text{Be}$ 蓄積の時間スケール(削剥速度に応じて $10^3$ – $10^5 \text{yr}$ )よりもはるかに短いため、流域の状態遷移過程に新たに生成される $^{10}\text{Be}$ の蓄積は無視できる。

人為的な荒廃の履歴、すなわち斜面侵食の加速により土層が喪失して、風化基盤岩が斜面上に露出する範囲が拡大してゆく過程は、荒廃流域の近傍の山麓低地に堆積するレガシーセディメントに記録されていると期待される。人為的な環境遷移が進行する過程では、荒廃流域から頻繁に排出される土砂が谷底を埋積し、河床の上昇を引き起こす。居住地を洪水氾濫から保護するために河川流路に沿って建設された人工的な堤防は、激しい洪水時には頻繁に破堤し、その結果として自然堤防や破堤ローブが形成される。すなわち、人為的侵食加速により斜面上の土層が損失するような環境変化の場合、レガシーセディメント中の $^{10}\text{Be}$ 濃度プロファイルは、 $^{10}\text{Be}$ 濃度の小さな粒子が供給されることを反映して、地表へ向かって減少する傾向がみられる可能性がある。流域における環境遷移の時期と期間は、埋没有機物の $^{14}\text{C}$ 年代から復元できる。また、歴史記録が入手できる地域では、史料から推測される地理的背景と、フィールドから得られる地質学的証拠を比較することで、環境遷移の原因やプロセスを検討できる。

### 3. 調査地域

研究対象に選定した滋賀県・田上山地は、中世以前に日本の首都であった京都の南東約20 km、奈良の北東約30 kmに位置する。この立地により、田上山地は、後述するように、長期にわたる人為的な環境攪乱を受けてきた。その結果として、現在、この地域のいくつかの流域は、対照的な土層および植生の状態を呈しているが、それらの地質や地形の条件はほぼ同じであるので、本研究のアプローチを適用するには理想的な環境といえる。

田上山地は、標高100–600 m、斜面傾斜20–35°の小起伏丘陵で、白亜紀後期の黒雲母花崗岩を基盤とする。田上山地の北西麓には、異地性の岩石(ホルンフェルスやチャート)

を含む鮮新世後期から更新世前期の弱固結堆積物（古琵琶湖層群および大阪層群相当層）が分布しており、花崗岩を不整合で覆っている。山麓低地では更新世中期以降の未固結な第四系に基盤岩が厚く覆われている。対象地域は温暖湿潤気候で、四季が明瞭である。降雨量は全域でほぼ同じだが、気温には琵琶湖の影響がやや認められ、湖から離れた高地ほど日較差が大きく、冬期にその違いが顕著になる。気温が 0℃以下になると、荒廃流域の斜面にはアイスレンズや霜柱が普遍的に発達する。特に高標高域ほど、地表付近で活発な凍結破砕作用が認められ、それに伴う土砂移動現象が確認されている。

田上山地の森林資源が地産地消の範疇を超えて利用され始めた時期は 1400 年前に遡る。自然植生は主に常緑広葉樹林であり、当時の首都である奈良と京都の大規模な木造の寺院や神社の建設に必要な大量の木材を供給した。自然植生が消費されるとマツがこの地域に優占するようになり、落葉樹や針葉樹を含む二次林が形成された。この地域の二次林は、中世の戦乱後に集中的に伐採され、人口増加に伴う日本全国の森林斜面の荒廃と同時に、木材が大量消費された。特に江戸時代初期に、田上山地の近傍では深刻な土層侵食と洪水が頻発しており、斜面からの土砂流出を抑制するための前近代的な対策が始まった。19 世紀後半から始められた近代的な砂防工事や植林の結果、現在の田上山地には、植林地をはじめ様々な樹種の二次林が分布し、そのほぼ全域が森林植生に覆われている。

現在の田上山地では森林植生が回復傾向にあるため、継続的に森林が成立していた流域と、人為影響により荒廃した履歴をもつ流域の区別がつきにくくなっている。そこで本研究では、1947 年米軍撮影の白黒航空写真の判読と、現地踏査に基づいて、田上山地の流域を森林流域、裸地流域、緑化流域の 3 つに区分した。森林流域とは、人為的な荒廃を免れて斜面の森林植生と土層の被覆が維持されている流域である。裸地流域とは、人為的な影響を受けた結果、明らかに植生が貧弱になり、無機質な斜面構成物質が斜面に露出した履歴をもつことを 1947 年の航空写真および現地踏査の双方から確認できる流域を指す。一方、緑化流域とは、1947 年の時点では既に森林植生が再生しているものの、裸地流域と同じく斜面上の土層被覆は人為影響を受けており、過去に荒廃流域であった痕跡を現地踏査から確認できる流域を指す。森林流域は本研究で言うところの保存流域にあたり、裸地流域と緑化流域は荒廃流域にあたる。

#### 4. 天然の流域削剥速度と環境遷移過程の削剥土砂量

地理空間情報解析および現地踏査に基づき、土層および植生状態の異なる 28 の小規模流域を、溪流堆砂を採集する流域として選択した（森林流域：10、裸地流域：12、緑化流域：6）。砂試料中の宇宙線生成核種  $^{10}\text{Be}$  の濃度を測定するために、溪流堆砂（2 mm 以下の粒子）を各流域の出口から採集した。試料中の  $^{10}\text{Be}$  濃度は、東京大学総合研究博物館の加速器質量分析装置によって測定した。

溪流堆砂中の  $^{10}\text{Be}$  濃度は、 $1.9 \times 10^4$ – $8.1 \times 10^4$  atoms  $\text{g}^{-1}$  であり、保存流域と荒廃流域で系統的に異なる。斜面上の土層被覆が保存されている森林流域では、すべての流域で

$^{10}\text{Be}$  濃度が  $>4 \times 10^4 \text{ atoms g}^{-1}$  である。一方、荒廃流域である裸地流域と緑化流域の  $^{10}\text{Be}$  濃度は、それぞれ  $1 \times 10^4 - 3 \times 10^4 \text{ atoms g}^{-1}$  と  $2 \times 10^4 - 3 \times 10^4 \text{ atoms g}^{-1}$  であった。流域間でデータを比較するために、分析した試料中の  $^{10}\text{Be}$  濃度 ( $\text{atoms g}^{-1}$ ) を対象流域の地表面における平均核種生成率 ( $\text{atoms g}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) で正規化した ( $C/P_0$ )。この  $C/P_0$  (yr) の値は、宇宙線の貫入深度以上の岩盤が土層へと分解され、侵食作用により斜面から取り除かれるまでの砂粒子の滞留時間を反映したプロキシとなっている。保存流域と荒廃流域での  $C/P_0$  の平均値は、それぞれ  $1.05 \times 10^4 \text{ yr}$  と  $5.4 \times 10^3 \text{ yr}$  であり、 $\pm 1\sigma$  の範囲で重複しない分布を持つ。

溪流堆砂中の  $^{10}\text{Be}$  濃度 ( $C/P_0$  値) の差異は、流域斜面の土層および植生の被覆状態に対する人為的な影響の程度の違いを反映しており、自然の地形的な要因と人為的な攪乱の両方の影響を受けていると考えられる。荒廃流域で溪流堆砂中の  $^{10}\text{Be}$  濃度が小さいのは、森林植生が斜面上に回復したとしても  $^{10}\text{Be}$  濃度の大きな土層が完全に喪失してしまえば、溪流堆砂中の  $^{10}\text{Be}$  濃度は低下することを示している。保存流域の溪流堆砂中の  $^{10}\text{Be}$  濃度から算出される長期的な削剥速度は、平均傾斜が  $29-36^\circ$  の流域では  $150-248 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  であり、斜面構成物質の密度を  $1.6 \times 10^6 \text{ g m}^{-3}$  と仮定すると、 $94-155 \text{ mm kyr}^{-1}$  に換算できる。

保存流域における削剥速度の平均値とばらつきの標準偏差を不確かさとして与えたもの ( $200 \pm 39 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ) を、荒廃流域での人為影響を受ける以前の流域における長期的な削剥速度  $D_{BG}$  (式 (2)) とすると、総削剥土砂量は、 $5.3 \times 10^5 - 2.9 \times 10^6 \text{ g m}^{-2}$  と計算される。また、削剥されたレゴリスの密度を、土層とサプロライトの最上部の平均かさ密度に基づいて  $1.6 \times 10^6 \text{ g m}^{-3}$  とすると、流域斜面から除去されたレゴリスの厚みは、 $0.3-1.8 \text{ m}$  となり、おおむね土層の厚み相当か、それよりもやや大きい値となる。平均勾配と標高に対しては、裸地流域と緑化流域のいずれの流域のデータも、ばらつきが大きいものの、急峻な流域や標高の高い流域では、総削剥土砂量が大きくなる傾向がある。このことは、人為影響を受けて斜面の土層および植生の被覆が消失すると、高標高域にある急峻な斜面ほど、冬期の凍結破砕作用による風化基盤岩からの土砂生産が活発になり、夏期のフラッシングにより斜面から排出される土砂量が大きくなることを示しているのかもしれない。荒廃流域ごとに総削剥土砂量が異なるのは、斜面浅層部から深部へ向けての斜面構成物質の力学的強度のプロファイルと除去可能な物質の厚さに支配されており、それは人為影響を受ける以前の流域における風化環境に依存するのではないかと考えられる。

## 5. 人為影響を免れた流域における土層の被覆状態

天然の流域環境における斜面上の土層および植生の被覆状態の成立過程を検討するために、この地域の代表的な保存流域である不動寺流域の凸形尾根型斜面および凹形谷型斜面において土層試孔を手掘りし、土層構造の観察と鉛直土層厚の測定を行った。また、斜面を構成する基盤岩石が風化により分解されて移動可能な土層へと転換される速度、すなわち、土層生成速度を宇宙線生成核種の分析により決定するために、土層構造を観察した土層試孔のうち地形曲率と土層厚の異なる複数の凸形尾根型斜面から 11 の地点を選択し、

土層直下のサプロライトを、それぞれの地点において深さ方向の幅 6 cm 以内から採取し、分析に供した。

不動寺流域では、全体として、凸形尾根型斜面で土層が薄く、凹形谷型斜面で相対的に厚い土層が発達する傾向にある。ただし、凹形谷型斜面では、滑落崖が明瞭で、表層崩壊が比較的最近に発生した痕跡がある場所においては土層が薄く、前回の表層崩壊発生から時間が十分に経過しているとみられる場所で土層が厚い。サプロライト試料から抽出された石英粒中の  $^{10}\text{Be}$  濃度は、 $4.0 \times 10^4$ – $1.1 \times 10^5 \text{ atoms g}^{-1}$  であった。得られた濃度から土層生成速度を求めると、土層厚が 0.15–0.85 m の凸形尾根型斜面では  $93$ – $238 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  であり、斜面構成物質の密度を考慮すると、 $58$ – $149 \text{ mm kyr}^{-1}$  という地表面低下速度に換算される。一般に土層の生成速度は、生物攪乱や凍結融解作用といったサプロライトからの物理的な土粒子生産に寄与するプロセスが土層の厚みに依存するため、土層厚が大きくなるほど小さくなると考えられているが、ここでは、土層厚が 0.2–0.3 m の地点のように同程度の土層厚であっても土層生成速度がばらついており、土層生成速度の減衰率を決める指数係数が ( $-0.681 \text{ m}^{-1}$ ) と小さかった。

不動寺流域で現在観測される土層厚は、この地域の地理的条件下で元来成立する土層の被覆状態を反映しているものと考えられる。凸形尾根型斜面では、土層の生成と輸送のバランスがとられることで、地形に対応して空間的に多様な定常厚みになっている。一方、凹形谷型斜面では、周辺の斜面からソイルクリープにより土層が集積し、エピソード的に表層崩壊が発生するため、その履歴に対応して土層厚がばらつくものと考えられる。調査対象の尾根で得られた土層生成速度は、単に土層厚の関数ではなく、局所的な斜面の傾斜角度や土層直下の基盤岩石の風化程度の差異といった地形・地質条件によって支配されていることを示唆する。土層生成関数の指数係数が小さくなる理由については現在のところ不明であるが、生物攪乱のような確率的なふるまいも土層の生成速度を支配する重要な要因になっていると推測される。ここで得られた土層生成速度は、保存流域の溪流堆砂を分析対象として得られた流域の空間平均削剥速度と同等の値であった。すなわち、岩盤の風化により生成されたレゴリスの一部が土層となって谷頭凹地へと輸送され、集積したのち表層崩壊によって除去されるというサイクリックシステムが、保存流域における土砂の生産と流出の量的バランスの維持を担っており、人為影響を受ける以前の流域環境では、移動可能となった風化生成物である土層は、表層崩壊により順次斜面から除去され、流域内に長期的に滞ることなく系外へ排出されていたものと解釈される。

## 6. 斜面土層の性状とその変化

不動寺流域（森林流域）と若女裸地谷流域（裸地流域）において、詳細な現地調査を行い、流域環境の遷移に伴う斜面上の土層および植生の性状変化を検討した。それぞれの流域における代表的な斜面浅層部の土層構造を把握するために、各流域の代表的な斜面において、簡易貫入試験による貫入抵抗 ( $N_c$  値) 調査を行った。また、土層厚の異なる土層試

孔を計 7 地点選定し、土層断面における樹木根系の分布密度と根径ごとの引張破断強度を測定した。

不動寺流域の測線では、土層が斜面を~1 m の厚みで覆っており、斜面上方ほど、風化が進んで強度の低下したサブロライト ( $10 < N_c < 50$ ) が厚く発達している。他方、若女裸地谷流域では無機質で未熟なレゴリスがごく薄く存在し (<20 cm)、斜面全体にわたって硬質な基盤岩 ( $N_c > 50$ ) が地表付近に存在している。不動寺流域のように腐植に富み空隙の多い地表付近の層準では土層の単位体積重量が小さく、間隙率が大きくなるが、それ以深の土層中には単位体積重量と間隙率に明瞭な変化は認められない。サブロライトは、土層に比べて単位体積重量が大きく、小さな間隙率をもつ。斜面構成物質の粒度組成は、概して、若女裸地谷流域の斜面構成物質の方が粗粒である。両流域ともに土層内の水理的な性質はほぼ均一で、不動寺流域の土層の平均飽和透水係数は、 $1.25 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  であり、若女裸地谷流域の土層の平均飽和透水係数は、 $1.91 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$  である。土層のせん断強度は、無機質で礫に富む若女裸地谷流域 (粘着力  $c = 1.9 \text{ kPa}$ , せん断抵抗角  $\phi = 34.6^\circ$ ) の土層は、不動寺流域の土層 ( $c = 4.1 \text{ kPa}$ ,  $\phi = 31.5^\circ$ ) に比べて粘着力が小さく、せん断抵抗角がやや大きい。

樹木根系の分布は、地表から深さ 15 cm のグリッドが最も密度が大きく、深度方向に分布密度が小さくなる。本研究で行った原位置引張破断試験から得られた樹木根系の引張破断強度  $S_r$  (kN) の回帰式は、 $S_r = 16.0 d_r^{1.74}$  とべき関数で回帰される関係が認められた。

不動寺流域と若女裸地谷流域での  $N_c$  深度プロファイルの違いは、流域環境の遷移に伴い斜面土層に加えて侵食に対する抵抗力の小さなサブロライトが除去されて、貫入抵抗値の大きな斜面構成物質の上を土層がごく薄く覆うようになったことを反映している。荒廃流域に現存する地形は、溪流堆砂中の  $^{10}\text{Be}$  に基づく削剥土砂量の推定が確からしいことを示している。風化基盤岩から直接土砂が生成されたばかりの未熟な土層で普遍的に観察されるように、粘土鉱物が十分に生成されておらずシルトサイズ以下の土粒子が少なければ粘着力は小さくなる。

土層断面で観測された樹木根の引張破断強度の回帰式に基づき、深度 10 cm ごとに発揮されるみかけの粘着力を求めると、地表付近では  $10^1$ – $10^2 \text{ kPa}$  であるが、深度が大きくなるにつれて小さな粘着力しか得られなくなる。森林植生が存在することで土層のせん断強度が補強されると、保存流域では風化基盤岩が露出することなく、森林生態系を維持できる程度に十分な厚みまで土層が発達できる。土層の安定性がもたらされれば、その存続期間のうちに土層内の粘土鉱物の生成や土粒子の細粒化も促されるため、保存流域の土層では無機的な粘着力もまた大きくなってゆくものと推察される。

## 7. レガシーセディメントの分析に基づく人為的侵食加速履歴の復元

最も人間活動の影響を強く受けたことが歴史記録と斜面被覆の状態の双方から明らかな天神流域をレガシーセディメントの掘削調査対象とした。本研究では、天神川の下流域における谷底埋積物と破堤堆積物の 2 タイプのレガシーセディメントを選んだ。コアリ

ング地点の選定に先立ち、まず両サイトでレーザー距離計を用いて地形断面を測量し、簡易貫入試験機を用いたサウンディングにより堆積物の厚さを推定した。掘削地点は、流域環境の遷移過程で上流域から流出してきた軟質な堆積物が厚く堆積しており、人為的な地形改変や周辺斜面からの土砂流入の影響を受けた形跡が認められない場所を選定した。堆積物コアは、油圧式パーカッション・ボーリングシステムを用いて深さ 1 m 間隔で採取し、慎重に実験室へ運び込んだのち、試料の記載と分析を行った。

堆積物コアの層序と  $^{10}\text{Be}$  濃度の深度プロファイルは、両地点で異なるパターンを示した。谷底埋積物は、粗粒砂層と細粒砂層が交互に現われ（上方粗粒化）、ユニット間には明瞭な不整合関係が認められる。正規化した  $^{10}\text{Be}$  濃度（すなわち  $C/P_0$  値）は、深さ 2 m 以深では保存流域の  $C/P_0$  値 ( $1 \times 10^4 \text{ yr}$ ) と同程度であり、それ以浅になると揺らぎながら荒廃流域の  $C/P_0$  値 ( $5 \times 10^3 \text{ yr}$ ) と同程度の値まで減少した。他方、破堤堆積物は、細礫や中礫を含む粗い堆積物粒子で一様に構成され、A コアのような  $C/P_0$  値の深度変化は認められなかった。 $^{14}\text{C}$  年代測定では、植物片は  $<300 \text{ cal yr BP}$ 、炭化物は  $0.8\text{--}4.2 \text{ cal kyr BP}$  と、サンプルの種類によって異なるオーダーの暦年較正值が得られた。

堆積物の層相は、谷底埋積物が複数の洪水イベントによって供給された土砂が徐々に蓄積されたことを示しており、破堤堆積物が様々な  $^{10}\text{Be}$  濃度をもつ土砂が人工堤防の破堤時に混合されて堆積したことを示している。堆積物中の  $C/P_0$  値の低下は、土層が完全に損失してサブライトから  $^{10}\text{Be}$  濃度の小さな石英粒子が侵食される領域の拡大を反映する。植物片の堆積年代から、堆積物中の  $^{10}\text{Be}$  濃度が増加したのは、過去 300 年間であり、この間に流域環境が遷移したと考えられる。谷底埋積物のコアにみられた  $C/P_0$  値の回帰的変動は、 $^{10}\text{Be}$  濃度の大きな土層が完全に損失して裸地斜面が次第に流域内に広がってゆくことで進行する環境変化の性質をあらわしており、流域環境が遷移すると  $^{10}\text{Be}$  濃度の大きな材料が流域内から消失するため、保存流域のような天然の  $C/P_0$  値のレベルへと回帰できなくなるのであろう。破堤堆積物のコアにみられた比較的均一な層相で、不明瞭な  $C/P_0$  値の深度変化は、同一の流域に起源をもつが、過去の洪水堆積物やそれを利用した人工築堤物が人工堤防の破堤時に混合されることで、均質化されたことを反映しているものと考えられる。炭化物 ( $0.8\text{--}4.2 \text{ cal kyr BP}$ ) は、燃焼後土層内に埋没していたものが人為的侵食加速に伴って山麓低地へと流出してきたものである。土層に覆われている保存流域と土層の消失した荒廃流域の  $C/P_0$  値の差分は、斜面上に発達する土層の入れ替わり時間にあたり (ca.  $5 \text{ kyr}$ )、炭化物の年代とも調和的である。すなわち、植生回復が追いつかなくなるほど過度に森林植生を消費し続けると、元の状態へと戻ることが難しくなったことをあらわしている。復元された環境遷移の履歴は、歴史記録とも整合的である。

## 8. 総論：いわゆるハゲ山とは何なのか

過度な森林資源の消費が流域環境に与えた影響は、斜面上の土層および植生の被覆状態を変化させることで土層の生成と除去の量的なバランスを崩し、より大きな速度で



斜面構成物質が更新される状態へと遷移させたことにある。人為影響を受ける以前の流域環境では、土層の生成と除去の量的なバランスが保たれていた（5章）が、森林植生が消失した荒廃流域では、冬期の凍結融解作用による風化基盤岩の粒状化と夏期の降雨により、天然の土層の生成と除去の速度に比べて 1-2 桁大きな速度でサプロライトから直接的に土砂が生産されている。森林の成立した斜面では植生による斜面防護効果が発揮されるため、削剥速度はソイルクリープなどによる斜面構成物質の輸送速度に依存した状態であるが、斜面が裸地化すると削剥速度は斜面表層での物理的風化による土砂生産に依存するようになる。流域環境の遷移に伴う土砂生産量の変化は、侵食に対する抵抗力が小さな斜面構成物質が斜面浅層に厚く発達している流域環境に特徴的なことと言えよう。

森林植生と土層に被覆された保存流域と斜面全体が裸地となった荒廃流域のような対照的な状態の出現は、土層の存続可能な厚みと時間スケールの限界値が変化したことの帰結と言える。人為影響を受けて土層および植生の被覆状態が変化すると根系によるみかけの粘着力が失われ、地表を覆う無機質土層も粗粒となって斜面構成物質は非粘着質となる（6章）。対象流域ごとに選定した土層断面から採取した土層の諸物性を代表値として、斜面上に存在できる土層の上限厚みを、樹木根系によるみかけの粘着力を加味して検討したところ、保存流域において現在観測される土層が、樹木根によるみかけの粘着力が得られることによってはじめて存在しうる厚みであることがわかった。また、土層が無機質となって総合的な粘着力が低下すると、表面侵食により斜面から土層が除去されやすくなり、未熟な土層が斜面を薄く覆う新たな準定常状態が維持されることが示唆された。

宇宙線生成核種を用いた環境変遷の履歴復元結果は、人為影響を受けて土層の流亡が開始してから風化基盤岩が斜面に露出した状態が流域内に広がるまでの間に数百年の時間を要したことを示している。すなわち、土層の安定性が低下する前に植生を回復させ、侵食の加速を抑制する対策をとれば風化基盤岩が斜面に露出し続ける状態へと流域の環境が遷移することを防ぐことができるという重要な示唆を与えている。このような人為影響による流域環境の遷移は、概念的には知られていたが、従来のアプローチでは定量的に評価できていなかった。本研究では、人為的侵食加速過程を評価するために宇宙線生成核種が適用できることを実証し、森林植生が再生不能になるほどに人為影響が加わると流域の環境が遷移し、恒常的に土砂が排出され続ける限り、花崗岩類のような非粘着質の風化生成物をつくる地質条件の場合では、その状態が維持されることを多面的な証拠に基づいて論証した。

## 9. 結論

本研究では、宇宙線生成核種  $^{10}\text{Be}$  を用いて流域の削剥履歴を評価・復元し、非粘着質な風化生成物をつくる地質条件の場合では、人為影響を受けて斜面から土層および植生が消失すると、恒常的に土砂が排出されるような新しい定常状態を遷移するため、元の状態へと回帰することが難しくなることを解明した。得られた結論は以下のとおりである。

1. 滋賀県・田上山地の場合、荒廃流域では環境遷移過程に斜面から削剥されたレゴリス

の総量は  $5.3 \times 10^5 - 2.9 \times 10^6 \text{ g m}^{-2}$  (厚みに換算して 0.3–1.8 m) であると溪流堆砂中の  $^{10}\text{Be}$  から推測された。これは、風化基盤岩から活発に土砂が生産され、露出高~1 m のトアが散在している荒廃流域の実態と整合的である。

2. 保存流域では、斜面上の土層生成速度と流域の空間平均削剥速度が、ほぼ同等であった。すなわち、保存流域では、岩盤の風化による土層の生成と削剥によるその除去が釣り合った状態にあり、荒廃流域では、人為影響を受けてこの量的なバランスが崩れている。
3. 保存流域と荒廃流域では、斜面構成物質の性状が異なっている。森林植生が存在している流域では、細粒分に富み相対的に粘着質な土層が、斜面上に厚く覆う。人為的影響により植生が消失して流域環境が遷移すると、露出した風化基盤岩に対する物理的風化と直接的削剥が作用し、土層が恒常的に排出されるため、化学的風化が十分に進行せず、細粒分が少ない無機質で非粘着質な土層が斜面を薄く覆う状態となる。
4. 森林が成立している場合、樹木根系は土層中に深さ 50–60 cm まで顕著に分布し、土層底面に向かってその分布が指数関数的に減少する。樹木根の直径と引張破断強度との間には、冪関数で回帰される関係が認められた。
5. 樹木根系による土層補強効果を考慮した解析によれば、保存流域で現在観測されるような土層厚は、樹木根系の効果がなければ存在できない範囲にある。他方、流域から森林植生が消失すると、土層の不安定化に加え、表面侵食により土砂流出が加速することも遷移において重要な役割を果たしているものと示唆された。
6. 荒廃流域の下流低地に堆積するレガシーセディメント中の  $^{10}\text{Be}$  濃度は、その上流域の斜面で生じた環境変遷をよく記録している。本研究で検討した谷底埋積物の場合、 $^{10}\text{Be}$  濃度の深度プロファイルは、浅い深度に向かって顕著な変動を伴う明らかな濃度減少の傾向を示した。これは、土層が削られる状態にある斜面と風化基盤岩が削られる斜面からの堆積物の混合による宇宙線生成核種の希釈があったことを反映している。 $^{10}\text{Be}$  濃度の深度変化や堆積物コア中に介在する有機物の  $^{14}\text{C}$  に基づく埋没年代および炭化年代の系統的な違いは、人為影響による土層の完全喪失が過去 300 年の間に劇的に進行したことを示す。レガシーセディメントから得られた  $^{10}\text{Be}$  と  $^{14}\text{C}$  のデータは、荒廃流域において、いわゆるハゲ山フロントが徐々に伝播していくことで人為的な環境遷移が進行したことを示している。この変化の時期と期間は、歴史的文書に記録されているように、この地域で森林資源の収奪が植生回復の速度を凌駕して行われ、環境変化が顕在化するタイミングと一致している。