鉱物学的解析によるダム堆砂の 発生源追跡に関する研究

荒生 靖大¹・伊藤 健一²・大石 博之³・村上 俊樹⁴・鈴木 祥広⁵

¹宮崎大学大学院工学研究科土木環境工学専攻 (〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西一丁目1番地)

E-mail: yasuihiro.arao@nishihara.co.jp

²宮崎大学特任准教授 国際連携センター (〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西一丁目1番地)

E-mail: itoken@cc.miyazaki-u.ac.jp

³西日本技術開発株式会社 調査解析部 (〒810-0004 福岡市中央区渡辺通一丁目1番地)

E-mail: h-ohishi@wjec.co.jp

⁴九州電力株式会社 (〒880-8544 福岡県福岡市中央区渡辺通二丁目1番地)

E-mail: Toshiki_Murakami@kyuden.co.jp

⁵宮崎大学教授 工学部社会環境システム工学科 (〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西一丁目1番地)

E-mail: suzuki@civil.miyazaki-u.ac.jp

ダムの貯水機能に深刻な影響を及ぼす堆砂問題の解決には、上流域の土砂発生源を特定することが重要である。しかしながら、地形や地質条件によって崩壊地が多数存在する流域では、発生源の特定が困難である。そこで本研究では、九州南部の宮崎県一ツ瀬ダムを対象とし、ダム上流域に点在する崩壊地から採取した土砂と、建設当初から50年間にわたって貯水池に堆積した土砂の鉱物学的・物理・化学的な特徴を解析し、両者の類似性からダム堆砂の発生源を特定した。元素・鉱物組成の類似性から、一ツ瀬ダム上流域における大藪衝上断層の直上・直下の土砂は、ダム堆砂と極めて高い類似性を示し、ダムに流入する土砂の発生源であると推察された。本研究で実施した鉱物学的解析法によって、ダム堆砂の発生源を特定することが示唆された。

Key Words : dam reservoir, sediment source tracing, mineral analysis, X-ray diffraction, landslide

1. はじめに

我が国のダム貯水池における堆砂問題は、大規模なダムの建設が開始された1950年代以降に顕在化している¹⁾。特に、我が国の河川流域は、急峻な地形や脆弱な地質、および水文学的条件によって、土砂流出が発生しやすい特性を有している²⁾³⁾。ダムはこのような環境下に築造するため、欧米の主要貯水池群と比較して、急速に堆砂が進行している。この堆砂現象は、貯水容量の減少を誘起し、発電や灌漑、水道水水源ならびに洪水調節など、本来の治水・利水目的である貯水機能を喪失させる恐れがある³⁾⁶⁾。会計検査委員会の調査報告によると、1940年(昭和15年)から2012年(平成24年)までに建設された20カ所のダムにおいて、堆砂量が既に計画堆砂量を上回っており、予想量の3倍以上の土砂が堆積している⁷⁾。また、106カ所のダムでは、計画堆砂量に達していないものの、洪水調節容量内に土砂が堆積し、治水機能の低下

が懸念されている⁷⁾。近年では、突発的に生じる局地的な豪雨によって全国的に洪水が多発しており、下流域の洪水による災害発生防止を図る上で、ダムの堆砂問題の取り組みはますます重要となってきた。

九州南部の宮崎県一ツ瀬川水系に存在する、水力発電を目的とした九州最大の一ツ瀬ダム(総貯水容量261,315,000 m³)では、1963年(昭和38年)の建設当初から50年間にわたって土砂が堆積している⁸⁾。また、一ツ瀬ダムの年間堆砂量は、全国で10番目(390,000 m³/年)に多く、ダム堆砂の問題が非常に深刻である²⁾。さらに、ダム堆砂の進行に伴い、貯水池上流では河床の上昇によって氾濫を起こしやすい地形条件となり、洪水時には道路や家屋の浸水が懸念されている⁸⁾。そこで中流域では、フラッシング排砂や排砂バイパスなど土砂放流設備の排砂技術の開発が推進されている⁸⁾。しかしながら、排砂に伴う下流河川の影響や費用負担の調整などの観点から中流域対策には限界がある。したがって、ダム

の堆砂問題を抜本的に解決するための第一段階として、堆砂の原因となる土砂発生源を特定することが重要である。ところが、一ツ瀬ダムの上流域では、年々増加する山地崩壊が多数存在することによって土砂発生量が増加しているにも関わらず、上流域の地質構造は複雑であるため土砂発生源を特定できていないのが現状である⁹⁾。

一方、最近になって、鉱物の特性から港湾・沿岸域における底質の輸送経路の特定、ならびに河川や河床下に堆積する浮遊堆積物の土砂発生源を推測する研究が報告されている^{10), 11)}。しかしながら、これらの研究では、鉱物種の詳細な同定を目的としておらず、不定方位法による鉱物の簡易同定によって推測するにとどまっている。土砂の堆積環境あるいは発生源の正確な情報を得るまでには、鉱物の元素組成や鉱物種のさらに詳細なデータに基づく解析が要求される。このような背景において、Murakami *et al.*は、鉱物の元素組成に加えて、定方位法 X 線分析による鉱物の種類と定量的なピーク強度によって、ダム貯水池における濁水長期化を引き起こす原因粒子の発生源追跡の手法を提案している¹²⁾。この手法をダム堆砂に応用することによって、ダムに堆砂する土砂の発生源の正確な追跡が可能となると考えた。そこで本研究では、九州南部の宮崎県一ツ瀬ダムを対象とし、広大なダム上流域に点在する崩壊地から採取した土砂と、ダム貯水池に堆積した土砂について鉱物学の物理・化学的な特

徴を解析し、両者の類似性からダム堆砂の発生源の特定を試みた。

2. 材料と方法

(1) 一ツ瀬川流域の概要

図-1に、一ツ瀬川流域図を示す。一ツ瀬川は、九州山地の尾崎山（標高1,438 m）、石仁田山（標高1,359 m）に

図-1 一ツ瀬川流域図

図-2 一ツ瀬ダムにおける地質ブロック図と調査位置図¹⁴⁾

図-3 一ツ瀬ダムにおける調査ボーリング位置

源を発し、宮崎県中央部を東南に流下して日向灘に注ぐ二級河川である。途中上流域で板谷川、小川川、銀鏡川などを合わせ、河口付近で三財川と合流しており、その流域面積は約852 km²、幹線流路延長は約88 kmである¹³⁾。また、一ツ瀬ダムの流域面積は415 km²と広大である。

図-2に、一ツ瀬ダム流域の地質ブロック図を示す¹⁴⁾。宮崎県地質図¹⁵⁾によると、一ツ瀬ダムよりも上流に位置する上流域は、四万十層群日向層群の乱雑層と砂岩優勢層が主な地質として分布するものとされている。このため、上流域では、鉱物学の特徴において大きな差異はないと考えられてきた。ところが、さらに詳細な地質調査を実施したところ、宮崎県地質図に示されている乱雑層は、多様な地質を呈することが明らかとなった¹⁴⁾。この地質ブロック図によると、上流域の地質は、低角度の衝上断層が繰り返しみられ典型的な付加体の地質構造を呈している。また、岩盤は、付加体の形成過程において変成作用を受けており、その程度は地質の年代が古いものほど高くなっている。地質ブロック図には、岩石の変成の程度を表す呼称として、「レベル (L)」が表記されている。このレベルは、L1からL4に向かって変成度が高くなっている。また、この上流域において多様な鉱物種が同定されている¹²⁾。上流域における地質の形成期間も異なることから、四万十帯の乱雑層において、レベルの違いによって鉱物学の特徴に差が生じる可能性は高いと推察した。

写真-1 地すべり箇所周辺状況と林道沿いの裸地法面状況

(2) 試料採取

a) ダム堆砂の採取

ダム堆砂は、一ツ瀬ダム貯水池内で調査ボーリングを実施し、建設当初から50年間にわたって堆積した土砂を採取した(図-3)。調査ボーリングの工期期間は、2010年3月2日～2010年3月25日であり、基盤岩の上層部である深度16mまでの柱状試料を採取した。

b) 上流域の土砂の採取

上流域の現地調査は、2011年～2012年の期間にわたって実施した(写真-1)。調査地点は、地質ブロック図に基づき、岩種・岩相、地質構造、断層・変質帯の有無とその特徴などを考慮して選定した。具体的には、これらの地点において、堆砂の発生源と推定される山斜面が大規模に崩落し、土砂が露出している裸地、伐採跡地・新植地の裸地および林道・作業道等の法面を対象とし、採取可能な22地点に決定した(図-2)。土砂試料は、各地点の裸地法面において、地層が明瞭に区分される層の中央付近から、各層毎にプラスチック製スコップを用いて湿潤状態で500 g～1 kgの土砂、岩石あるいは粘土を採取し、合計60試料とした。地層は、1地点あたり2～5層に20～100 cmの幅で明瞭に区分できた。なお、調査地点の表示は、変成度・岩種—地点番号順(地層番号)とした。例えば、変成度レベルがレベル1(整然頁岩)の地点1の

最上層であればL1-I(1), 岩種が花崗閃緑岩 (Granodiorite) の地点1の最上層であればG-1(1)と表記する。なお, 上流域における広域的な土砂の鉱物学的情報を得るため, 調査地点には, ボーリング地点の堆砂に関与しない地点も選定している。

(3) 粒子の回収

a) ダム堆砂の粒子の回収

図4に, ボーリング柱状図を示す。柱状試料は, 鉱物学の物理・化学的な性状と, それらから推定される堆砂履歴を把握するため, 粒径や色調などコアの観察・分類を行い, 14層に土質区分した。各堆砂層の表示は, 採取地点名ー層番号の順に行った。採取地点名は, 一ツ瀬ダム貯水池の頭文字から (H) とした。H-1~H-14について, 粒径による鉱物学的な特徴の違いを比較するため, 全岩試料 (計14試料) と, 20 μm のふるいを通過した粒径20 μm 以下 (以降, $\leq 20 \mu\text{m}$ 試料とする) の試料 (計12試料) を各層から採取し分析に供した。全岩試料については, 自動乳鉢 (ニッター製, ANM-1000 型) で粉碎した粉末試料を用いた。なお, 4層目と11層目は, 粒径が大きく20 μm のふるいの通過量がわずかであったため, 全岩試料のみを分析した。

b) 上流域の土砂における粒子の回収

ダム上流域の各地点において採取した岩石は, 表面に付着している粘土を水道水で洗浄した後に室温で風乾した。粘土質の土砂は, 含水率が高く乾燥収縮が大きいことから, 粘土の微細構造の改変を避けるため, 真空凍結乾燥装置 (EYELA 製, FDU-1200 型) による乾燥を行った。また, 試料に含まれる水分が完全に気化し, 真空凍結乾燥装置のセル室が室温状態となったときを乾燥終了の目安とした。風乾および凍結乾燥後の全試料は, ハンマーで 1 cm 径以下に粉碎し, その後自動乳鉢で粉碎した粉末試料を分析に供した。

(4) 粒子の性状解析

ダム堆砂および上流域の土砂の特徴を把握するために, 回収した全粒子について物理・化学的な分析・解析を以下の方法で実施した。

a) 画像解析

走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM; 日立ハイテクノロジーズ, S-5500) によってダム堆砂の粒子画像を観察し, SEM 画像を撮影した。

b) 土色分類

標準土色帖¹⁰⁾を用いて, 各堆砂層の土色を観察した。濾紙上にて試料全体が濡れる程度に水を噴霧し, 室内の

明るい窓際において、測方 45° で湿土の色を観察した。

c) 元素組成

土砂の主成分元素組成は、エネルギー分散型蛍光 X 線分析 (Energy Dispersive X-ray Fluorescence, ED-XRF; SHIMADZU, EDX-720) によって測定した。測定条件は、加圧電圧 50 kV, 電流 142 mA とした。なお、本研究で対象とする主成分元素は、鉱物の基本元素である Fe, Al, Si, Mg, Ca, K とした。

d) 鉱物組成

全試料は、日本粘土学会が定める粘土ハンドブック¹⁷⁾ に準じて、塩化マグネシウム飽和处理 (Mg), マグネシウム飽和处理後のグリセロール処理 (Mg-Gy), 塩化カリウム飽和处理 (K), カリウム飽和处理後の 300 °C 加熱処理 (K-300), 550 °C 加熱処理 (K-550) の 5 処理の定方位試料を作成し、粉末 X 線回折 (X-ray Diffraction, XRD; PANanalytical, X'Pert Pro) 分析による測定を行った。X 線回折では、X 線回折パターンを取得し、得られたピークから含有鉱物を同定した。照射 X 線は CuK α 線とし、測定条件は加速電圧 45 kV, 電流 40 mA, 回折速度 2 °/min である。また、X 線回折によって得られた顕著な回折角度のピーク強度を用い、式(1)からピーク強度比 (%) を算出し、定量的な鉱物含有率の比較を行った¹²⁾。

$$\text{ピーク強度比(\%)} = I_i / (\sum I_i) \times 100 \quad (1)$$

なお、 i は X 線回折によって同定された鉱物種を表し、 I_i は各鉱物を代表するピーク強度を表している。

(5) 粒子の類似性評価

ダム堆砂とダム上流域の土砂との類似性は、主要な成分元素 (Fe, Al, Si, Mg, Ca, K) の割合 (%) と顕著な X 線回折角度のピーク強度比 (%) の 2 項目について、それぞれクラスター解析によって評価した。クラスター間の距離は、グループ内平方和を最小とする Ward 法¹⁸⁾ を用いて解析した。

3. 結果と考察

(1) ダム堆砂における各堆砂層の比較

a) ダム堆砂の土色および粒子形状

標準土色帖に基づく堆砂の土色を確認したところ、わずかな色の違いが観察された (図-4)。暗灰黄色 (2.5Y 4/2) などはシルトの多い層、黒褐色 (2.5Y 3/2) などは粘土や砂の多い層と一致した。しかしながら、各層の土色は比較的暗い色 (黒, 褐, 灰など) であったため、顕著な差はなかった。全岩と $\leq 20 \mu\text{m}$ の全試料における SEM 画像を観察したところ (写真-2), 全岩には数 10 μm から最大 500 μm の角張った粒子が多く確認された。

写真-2 ダム堆砂のSEM顕微鏡による画像

一方の $\leq 20 \mu\text{m}$ では、全岩において観察された角張った粒子の他に、さらに微小な 5 μm ~ 10 μm の平板状の粒子が多く観察された。いずれの形状も極めて類似しており、堆砂層間で構成粒子の形状に顕著な違いは観察されなかった。SEM 画像による各粒子の形状から各層の特徴を分類することは困難であった。

b) ダム堆砂の主成分元素組成

図-5 に、全岩と $\leq 20 \mu\text{m}$ における主成分元素率を示す。粒径別に比較すると、いずれの試料においても、 SiO_2 は最も多く含まれ、全体の約 60~70% を占めていた。これは、地表面の主な岩石を構成し、最も普遍的に存在するシリカ鉱物 (石英) の影響が考えられる。また、粒径が大きくなると、鉱物の基本構造を成す SiO_2 の占める割合が大きくなる傾向を示した。この要因として、石英は比較的大きな粒子であることから、その多くは 20 μm のふるいに残存したと考えられる。全岩と $\leq 20 \mu\text{m}$ の全試料における Al_2O_3 は、全体の 20% 程度を占めているのに対して、 MgO (1.52%~1.95%) の存在率は極めて小さかった。このことから、全試料は Al 質の粘土塊とする 2 八面体型雲母であるイライトが含有されている可能性が高い。また、全岩と $\leq 20 \mu\text{m}$ の試料の組成を比較すると、 SiO_2 の組成率は全岩の方が高かったが、その他の元素組成は、極めて近い値を示した (図-5)。そこで、全岩と $\leq 20 \mu\text{m}$ の試料の元素組成について、それぞれ堆砂層間で比較した。その結果、全試料の主成分元素率の平均値に対する各試料の主成分元素率は、極めて高い相関を示した (全岩試料: $r^2=0.999\sim 1$, $\leq 20 \mu\text{m}$: $r^2=0.996\sim 0.999$)。これらの解析結果から、このダムでは、全岩と $\leq 20 \mu\text{m}$ の試料における各堆砂層の元素組成は、表層から低層まで同一であることがわかった。

c) ダム堆砂の鉱物種とその組成

図-6に、全岩と $\leq 20 \mu\text{m}$ の各堆砂層における未処理の

図-5 ダム堆砂の主成分元素率

X線回折パターンを示す。全岩における各堆砂層の回折パターンは類似しており、H-1と同じ回折角度のピークが、最下層に至るまで検出された。また、 $\leq 20 \mu\text{m}$ の全層の回折ピークについても、全岩と同じ回折角度において検出された。全層において、全岩と $\leq 20 \mu\text{m}$ の回折パターンは、類似する結果となった。そこで、各堆砂層の粒子の起源が同一であるか、あるいは別起源の粒子が混在しているかを推察するため、各層の鉱物種を同定し、その組成率を比較した。

鉱物の同定は、日本粘土学会が定める粘土ハンドブック¹⁷⁾に従って行った。図-7に、全岩と $\leq 20 \mu\text{m}$ のH-1から得られた定方位法X線回折パターンを示す。14 Åの反射は、スメクタイト、パーミキュライト、緑泥石に特有なピークである。スメクタイトであれば、Mg飽和させた試料にグリセロールを噴霧した場合、グリセロールが層状ケイ酸塩の層間に入り込み、17 Åにおいてピークが確認される。しかしながら、この処理による17 Åのピークは確認されず、スメクタイトの可能性は否定された。また、パーミキュライトは、層間にKが固定され、層間距離が10 Åに変化する。ところが、塩化カリウム処理においてもピークの変化は確認されなかった。したがって、14 Åを示す反射は緑泥石と判断した。10 Åの反射は雲母類粘土物とハロサイトのものいずれかの可能性が考えられるが、グリセロール処理による変化は確認されず、550 °Cの加熱後もピークは残存した。このことから、10 Åの反射は雲母類粘土鉱物（イライト、白雲母）と判断した。このイライトの存在は、元素組成の結果を反映している。7 Åを示す反射は、カオリン鉱物と蛇紋石の存在を示唆している。カオリン鉱物は、550 °Cの加熱によって、結晶構造が崩壊しピークが消失する。H-1における7 Åのピークは、300 °Cまで残存し、

550 °Cでは消失した。このことから、7 Åの反射はカオリナイトと判断した。また、他の反射から灰長石、石英といった鉱物も確認された。これらのことから、粒径の大きさに関わらずH-1は、同一の6種類の鉱物（緑泥石、イライト、白雲母、カオリナイト、石英、灰長石）を含有していることがわかった。また、他試料の含有鉱物についても、H-1と同一種が同定された。そこで、各堆砂層で共通して同定された6鉱物について、各鉱物を代表するピーク強度を用いてピーク強度比を算出した。いずれの試料においても、各鉱物の組成率はほぼ一致した。

14層に土質区分された16 mの柱状試料のそれぞれについて、X線回折パターン、鉱物種、および組成を比較した結果、深度方向での鉱物組成に大きな差異は確認されず、全層において同一の鉱物を含有していることが明らかとなった。したがって、ダム堆砂は、最上層のH-1から最深層のH-14に至るまで同一の起源である可能性が極めて高い。さらに、土色、構成粒子の形状、元素組成の各項目においても、全ての堆砂層において極めて高い類似性が確認された。以上の結果から、堆砂履歴の調査結果を総合的に評価すると、一ツ瀬ダム貯水池において、ボーリング地点に堆積した主要な土砂は、50年間特定の同質の地質帯から流入していることが示唆された。一ツ瀬ダムの上流域では、年々増加する山地崩壊が多数存在することによって土砂発生量が増加しており、これらの土砂は、多数設置されている支川の砂防ダムあるいはダム貯水池の別地点に堆積しているのではないかと考えられる。

(2) 上流域の土砂の主成分元素組成

表-1に、本調査域を代表する各地質帯における土砂

図-6 ダム堆砂の各堆砂層における未処理の X線回折パターン

Ch : 緑泥石	An : 灰長石	Il : イライト	K : カオリナイト	Mu : 白雲母	Qz : 石英
----------	----------	-----------	------------	----------	---------

図-7 ダム堆砂の最上層における定方位 X線回折パターン

の主成分元素率を示す。上流域の土砂における主成分元素の組成率は、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 の順位に高かった。 SiO_2 の組成率が、他元素と比較して突出している傾向は、全ての地質帯と同様であり、本調査域で最も普遍的に存在した。 Al_2O_3 と Fe_2O_3 は、高変成度帯であるL4において高く、粘土鉱物を多く含有していることを示唆している。その一方で、ガラス質の粒子や石英など多くのシリカ鉱物を含む砂岩（地質 S）と石英閃緑岩との中間の組成を有する花崗閃緑岩（地質 G）では、 Fe_2O_3 の組成率が低い傾向を示した。 CaO の組成率は、地質 G と L2/L3において最も高く、Ca に富む鉱物を多く含有していることを示唆している。 MgO はいずれの試料においても微量あるいは不検出であった。

(3) 上流域における土砂の鉱物種とその組成

図-8 に、本調査域を代表する各地質帯における鉱物含有率を示す。上流域の全試料において、 $10\text{\AA}$ と $4.26\text{\AA}$ に帰属できる回折ピークを確認することができた。また、各処理によるピークの挙動も一致しており、全試料においてイライト、白雲母、石英が同定された。地質 G、L1/L2、L2/L3、L3/L4、L3、L4 では、 $14\text{\AA}$ 、 $7\text{\AA}$ 、および $4.0\text{\AA}$ においても回折ピークが確認され、各処理の回折パターンから緑泥石、カオリナイト、灰長石が同定された。したがって、これらの地点において、緑泥石、イライト、白雲母、カオリナイト、石英、灰長石の6種の鉱物が同定された。地質 S の地点1では、同一の6種の鉱物で構成されていたが、緑泥石とカオリナイトの組成率は低かった。また、地質 S の地点2においては、これら2種の鉱物の存在を示すピークは検出されず、イライト、白雲母、石英、灰長石の4種のみで構成されていた。両地点とも他の地質帯と比較して、石英の組成率が約60%と卓越していたことから、粘土鉱物の反射強度は低く石英粒子に富んだ地質帯であると考えられる。共通の6鉱物が同定された地質帯(L1/L2、L2/L3、L3/L4、L3、L4)では、イライト、白雲母、石英の組成率が高かった。しかしながら、地質 G では石英に次いで、灰長石が36.3%と非常に高い割合で存在していた。これは、地質 G が花

崗閃緑岩で構成されていることを反映している。各地質帯の粘土鉱物（緑泥石、イライト、白雲母、カオリナイト）についてみると、地質帯ごとで粘土鉱物の組成率の増減が認められ、全域で風化変質の進行に伴う鉱物変化が生じていると考えられる。しかしながら、スメクタイトの増加やイライト/スメクタイト混合層の存在など、化学的風化作用初期の変質を示す特性は認められなかった。一方で、S-1(2)を除く地質帯では、化学的風化作用後期に生成されるカオリナイトが同定されている。カオリナイトには、緑泥石が混合層鉱物、中間体鉱物（Al-バーミキュライト）を経由してバーミキュライト化し、最終的にカオリナイトに変質するといった風化系列が存在する¹⁹⁾。特に、L3/L4 では緑泥石の減少に伴って、カオリナイトの組成率の増加が認められ、鉱物に共通して含まれる石英とカオリナイトが同程度の組成率を示した。これに対して、他の地質帯におけるカオリナイトは微量であった。このことから、L3/L4 では局所的な風化環境に支配されて粘土化が進行していることが示唆された。

(4) ダム堆砂と各地点の土砂における元素組成の類似性評価

図-9 に、ダム堆砂と上流域の土砂における元素組成

図-8 上流域の土砂の鉱物含有率

表-1 上流域の土砂の主成分組成

変成度・地質	地点	主成分元素率 (%)					
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	K_2O
S	2(2)	60.8	26.8	1.84	1.15	0.27	6.74
G	1(1)	64.9	26.4	0.13	0.00	1.38	2.41
L1	4(4)	66.1	24.7	1.81	0.95	0.00	5.45
L1/L2	1(2)	54.9	32.0	3.21	0.80	0.73	5.45
L2/L3	1(3)	63.9	21.5	5.16	1.52	2.21	4.01
L3	3(2)	60.3	26.0	7.10	1.17	0.00	4.20
L3/L4	6(3)	67.1	19.3	5.13	1.26	0.21	3.16
L4	1(3)	56.2	28.1	8.75	1.45	0.00	3.82

図-9 成分組成におけるクラスター分析結果の樹上図

図-10 鉱物組成におけるクラスター分析結果の樹上図

のクラスター分析の結果の樹状図を示す。類似度には、ユークリッド平方距離を尺度とした。クラスター間の類似度は、各試料の相対的な結合距離の20%以内で結合した試料でクラスターを分類した。

元素組成では、ダム堆砂と類似性80%のクラスターに、L3/L4の土砂試料が最も多く含まれていた。特に、L3/L4-1(3)、L3/L4-6(3)、およびL3/L4-7(1)は、ダム堆砂との類似性が約98-99%であり、堆砂と組成率がほぼ一致した。また、ダム堆砂と類似性50%のクラスターBを形成している試料は、L3/L4の土砂試料であった。変成度の高いL3とL4は、元素組成ではクラスターEに分類され、堆砂との類似性は低い。地質SはクラスターC、L1とL1/L2はクラスターDに分類される傾向を示した。地質Gの土砂試料は、ダム堆砂と類似性0%のクラスターEに最も多く分類された。調査域の地質は、地質ブロック図によって詳細に分類されているが、頁岩・泥質岩といった堆積岩で構成されているため、組成率には差が生じにくいものと考えられる。しかしながら、クラスター分析を実施することによって、各地質帯の組成率の特徴や違いが判別でき、変成度や岩種ごとに区分することが可能である。

(5) ダム堆砂と各地点の土砂における鉱物組成の類似性評価

鉱物組成の類似性は、各鉱物のX線回折ピーク強度比のクラスター解析から評価した。図-10に、X線回折ピーク強度比におけるクラスター分析の結果の樹状図を示す。評価方法・定義は図-9と同一である。

ダム堆砂と類似性を示した土砂は、クラスターFに分類された。このクラスターを構成する土砂は、カオリナイトを多く含有するL3/L4の土砂試料であった。このことから、ダム堆砂と同一の鉱物を有する土層は、L3とL4の境界部に分布していることが強く示唆された。地質Gの土砂試料についてみると、元素組成と同様にダム堆砂との類似性は低く、鉱物組成ではクラスターHとKに分類された。近年、一ツ瀬ダム上流域において、花崗閃緑岩（地質G）で構成されているエリアは、航空写真と衛星画像の判読から崩壊地ならびに伐採地が急増していることが明らかとなった²⁰⁾。このため、地質Gのエリアは、本研究で調査したボーリング地点の堆砂の発生源である可能性が高いと考えられてきた。これに対して、ダム堆砂と類似性0%の地質Gの土砂試料は、ボーリング地点付近の貯水池へ流下している可能性は低いと推察される。L3はクラスターKに加えてクラスターGにも分類されている。L3では、風化・変成の違いによって、変成度の低い岩相も存在することから¹⁴⁾、異なる2つのクラスターに分類されたと考えられる。地点ごとに鉱物組成が異なる地質Sについてみると、地点1はク

ラスターK、地点2はクラスターGにそれぞれ分類された。

(6) 地質との関係

成分とX線回折ピーク強度比の両方の解析結果から総合的に評価すると、クラスターAおよびFに分類されたL3/L4-1(3)、L3/L4-6(3)、L3/L4-7(1)は、ダム堆砂と最も高い類似性を示した。したがって、L3/L4における1、6、7地点の土層は、ダム堆砂の発生源である可能性が極めて高い。元素・鉱物組成の類似性の解析結果から、ダム堆砂と類似性が確認された地点は、全てL3とL4の境界部となる「大藪衝上断層¹⁴⁾」の直上(L3/L4-7)ならびに直下(L3/L4-1、L3/L4-6)に分布した。すなわち、大藪衝上断層の直近の岩体がダム堆砂に寄与していると推定される。また、L3とL4の境界部では風化が著しく進行していることが明らかとなった。岩石の風化変質は、地すべり発生の素因として従来より指摘されている²¹⁾。このため、地すべりの発生は、岩石の風化と相互に関係して生じていると考えられている²²⁾。風化によって生成した粘土のせん断破壊により発生する風化岩地すべり²³⁾は、その典型的な例である。したがって、大藪衝上断層沿いは、山地崩壊する可能性が最も高いと推察される。なお、今回の解析では、ダム堆砂と一致したL3/L4-7は、銀鏡川上流部に位置しており、L3/L4-7の土砂は今回の調査ボーリング地点には直接流入しない。したがって、L3/L4-7に類似した土砂がボーリング地点の集水域に存在する可能性がある。ダム上流域の土砂の追加データとダム堆砂の面的な調査が必要である。

ダム堆砂とダム上流域の土砂の鉱物学的な類似性から、ダム堆砂を引き起こす原因土砂の発生源エリアを、大藪衝上断層の直近まで大幅に絞り込むことができた。一ツ瀬ダム貯水池に堆積している土砂の大部分は、50年間にわたって、このエリアから流入していることが強く示唆された。しかしながら、L3とL4の境界部に分布しているにも関わらず、ダム堆砂との類似性が低い地点も確認された（クラスターEとK）。X線回折のピーク強度は、鉱物の風化度あるいは結晶度に依存するため、大藪衝上断層全域では局所的に風化条件が異なり、堆砂に寄与しない地点が存在している可能性も否定できない。今後は、このエリアの土砂試料採取と解析に加えて、さらに詳細な地質学的調査も並行して実施すべきである。

4. まとめ

(1) 調査ボーリングで得たダム堆砂(1地点)の各堆砂層では、土色、粒子の形状、元素組成、鉱物組成の全てにおいて、極めて高い類似性が確認された。一ツ

瀬ダム貯水池のボーリング地点に堆積している土砂は、50年間特定の地質帯から流入している可能性が高い。

- (2) 元素組成とX線回折ピーク強度比と二つの評価から、ダム堆砂と最も類似していた試料は、L3/L4-1(3), L3/L4-6(3), L3/L4-7(1)であった。ダム堆砂の発生源は、L3/L4-1(3), L3/L4-6(3), L3/L4-7(1)であると推察される。
- (3) ダム堆砂と類似性が確認された地点は、全てL3とL4の境界部となる大藪衝上断層の直上ならびに直下に分布していた。一ツ瀬ダム貯水池に堆積している土砂は、50年間にわたり大藪衝上断層の直近から流入していることが強く示唆された。

謝辞：本研究を実施するに当たり、土砂崩壊地や林道・作業道での試料採取にご協力頂きました関係者各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 海野修司, 辰野剛志, 山本晃一, 渡口正史, 本田信二：相模川水系の土砂管理と河川環境の関連性に関する研究, 河川技術論文集, Vol. 10, pp. 185-190, 2004.
- 2) (財)ダム水源環境整備センター：ダムの堆砂対策技術ノート, pp. 4-28, 2008.
- 3) 井上素行：山地から河川、海域にわたる流砂系問題に対する実証的研究の推進, 科学技術動向, pp. 3-32, 2009.
- 4) 大矢通弘, 角哲也, 嘉門雅史：ダム堆砂の性状把握とその利用法, ダム工学, Vol. 12, No. 3, pp. 3-32, 2002.
- 5) 吉良八郎：貯水池の堆砂問題について, 土木学会論文報告集, Vol. 193, pp. 23-33, 1971.
- 6) 高橋裕：新版 河川工学, 東京大学出版会, pp. 95-102, 2008.
- 7) 会計検査院：ダムの維持管理について, pp. 1-7, 2014.
- 8) 九州電力株式会社：ダム・貯水池の土砂管理の検討(案), pp. 1-6, 2009.
- 9) 村上俊樹, 太田勝康, 鈴木祥広：ダム貯水池における濁水長期化を引き起こす原因粒子の発生源追跡, 電力土木, Vol. 369, pp. 37-41, 2014.
- 10) James, H. R., Kira, M. and Patrick, B. L. : Sand sources and transport pathways for the San Francisco Bay coastal system, based on X-ray diffraction mineralogy, *Marine Geology*, Vol. 345, pp. 154-169, 2013.
- 11) Fryirs, K. and Gore, D. : Sediment tracing in the upper Hunter catchment using elemental and mineralogical composition : Implications for catchment-scale suspended sediment (dis)connectivity and management, *Geomorphology*, Vol. 193, pp. 112-121, 2013.
- 12) Murakami, T., Suzuki, Y., Oishi, H., Ito, K. and Nakao, T. : Tracing the source of difficult to settle fine particles which cause turbidity in the Hitotsuse reservoir, Japan, *Journal of Environmental Management*, Vol. 120, pp. 37-47, 2013.
- 13) 宮崎県：一ツ瀬川水系河川整備計画, pp. 1-41, 2012.
- 14) 村上俊樹, 鈴木祥広, 大石博之, 中尾登志雄：一ツ瀬ダム上流域における長期濁水化に関与する土砂分布地点と地質構造との関係, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 68, No. 7, pp. 251-257, 2012.
- 15) 村田明広：宮崎県の四万十帯の地質 宮崎県地質図第5版説明書, pp. 12-19, 1998.
- 16) 小山正志, 竹原秀雄：標準土色帖(第34版), 富士平工業, 2011.
- 17) 日本粘土学会編：粘土ハンドブック(第3版), pp. 502-503, 技報堂出版, 2009.
- 18) 神畠敏弘：データマイニング分野のクラスタリング手法, 人工知能学会誌, Vol. 18, No. 1, pp. 59-65, 2003.
- 19) Murakami, T., Isobe, H., Sato, T. and Ohnuki, T. : Weathering of chlorite in a quartz-chlorite schist, I, *Mineralogical and chemical changes, Clays and Clay Minerals*, Vol. 44, pp. 244-256, 1996.
- 20) 村上俊樹：ダム貯水池の長期濁水化を引き起こす原因粒子の発生源追跡に関する研究, 宮崎大学大学院修士学位論文(未公刊), pp. 8-9, 2013.
- 21) 米田哲郎, 大河原正文, 多田元彦：岩手県明倉沢地すべり地の風化岩中にみられる緑泥石のパーミキュライト化について, 粘土化学, Vol. 35, No. 1, pp. 24-33, 1995.
- 22) 山崎新太郎, 千木良雅弘：泥質片岩の風化メカニズム, および、風化と地すべりの関係について；四国三波川帯の不攪乱ボーリングコアを用いた解析, 地質学雑誌, Vol. 114, No. 3, pp. 109-126, 2008.
- 23) 藤原明敏：応用地質学(新藤静夫編), 応用地質学研究会 筑波, pp. 219-266, 1981.

(2015. 8. 24 受付)

TRACING THE SOURCE OF SEDIMENT IN HITOTSUSE DAM RESERVOIR USING MINERAL ANALYSIS

Yasuhiro ARAO, Kenichi ITOU, Hiroyuki OISHI, Toshiki MURAKAMI
and Yoshihiro SUZUKI

Sediments have become a serious problem in the management of the Hitotsuse Dam Reservoir (reservoir capacity: 261,361,500 m³), Miyazaki, Japan. The prevention of sediments in reservoirs remains a challenge, because the catchments can contain many landslip areas and the strata architecture is complex. In this study, we investigate the source of the sediments in the reservoir using mineral analysis. The core sample was collected by a boring machine from a 16 m sediment depth. To assess the nature of the particles, landslide soils accumulated in catchments of the Hitotsuse Dam were sampled and analyzed. Energy dispersive X-ray fluorescence (ED-XRF) and X-ray diffraction (XRD) were used to determine the component composition and mineral composition of the sediments, respectively. Cluster analyses were performed to evaluate the similarity in the component and mineral compositions of each sample. Component and mineral compositions of core samples indicated high similarities with the landslide soil to three samples out of 60 samples taken at 22 points. The points of three samples locate along the same stratum. It was strongly suggested that the sediments were continuously supplied from the same stratum located in the upper river basin. This method has the potential to determine the substances that release sediments in reservoirs and the location of the substances in the soil. Appropriate countermeasures to reduce the accumulation of sediments can then be taken at those specific locations.