

放射性同位体トレーサを用いたダム流域における降雨出水時の土砂生産源推定

(独) 土木研究所寒地土木研究所 道央支所 ○丸山 政浩
(独) 土木研究所寒地土木研究所 水環境保全チーム 水垣 滋
(独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地河川チーム 村上 泰啓

前報では、二風谷ダム湖のボーリングコア（平成19年採取）から放射性同位体が長期的な土砂生産源の推定に有益なトレーサとなることを報告した。二風谷ダム流域では平成22年8月降雨出水による顕著な土砂生産が確認されている。本報では、出水前後の二風谷ダム湖の堆積土砂を用いて、放射性同位体トレーサによる土砂生産源の推定と粒度組成、降雨特性から平成22年8月出水時の流域土砂流出について検討した。

キーワード：土砂生産源、放射性同位体、堆積土砂

1. はじめに

地殻活動が盛んな日本では河川流域からの土砂生産が活発であるため、山から海まで水系一貫した土砂管理が必要である。とくに浮遊土砂は、大半が山地から海域まで河床にとどまることなく流下するため、生産源における対策が重要となる。浮遊土砂を河川に大量に供給する地すべりや斜面崩壊といった大規模な土砂生産は地質に大きく依存する可能性があり¹⁾、その生産源を把握することは、流域の土砂管理計画を立案する上で極めて有用な情報となる。

一般的に土砂生産源の把握は、ダム堆砂データをもとに推定されることが多く、多目的ダムといった貯水池の大きなダムを対象に、降雨や地形、地質を規定要因としたさまざまな土砂生産量の推定式が提案されてきた^{2,3,4)}。しかし、ダム流域を単一の地質構成とみなして流域間の土砂生産量を比較するものが多く、流域内の土砂生産源の空間分布については考えられていない。

土砂生産源を空間的に把握する有効な手法として、トレーサを用いた生産源推定手法が注目されている。近年、欧米では浮遊土砂の生産源を放射性同位体をトレーサとして推定した事例が報告されている⁵⁾。Mizugakiら⁶⁾は北海道の鶴川・沙流川流域を対象に、天然放射性同位体 (^{210}Pb 、 ^{228}Ac 、 ^{40}K) をトレーサとして土砂生産源を地質（岩石）によって6種類に区分でき、それぞれの生産源の浮遊土砂に対する寄与率を推定できることを報告している。このトレーサ手法を、水文・堆砂データの蓄積されたダム流域に適用することで、流域の土砂生産源を空間的に把握できる可能性がある。

丸山ら⁷⁾はこの手法を用いて、二風谷ダム湖における過去10年間の堆積土砂の生産源を推定し、年平均的な生産源の寄与率は流域の地質による土砂生産特性を反映している可能性があることを報告した。しかし、堆積土砂

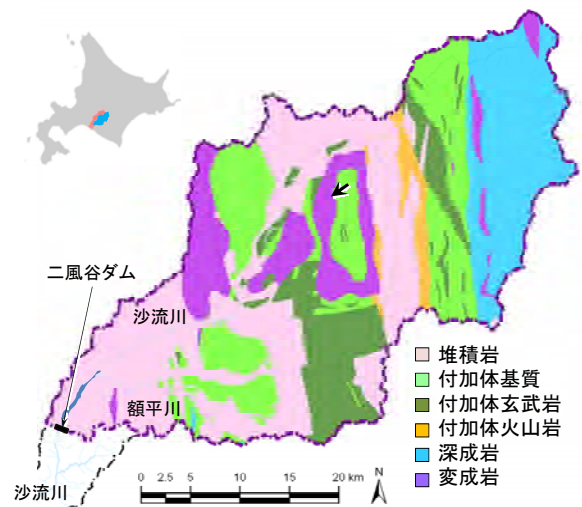


図-1 調査地概要

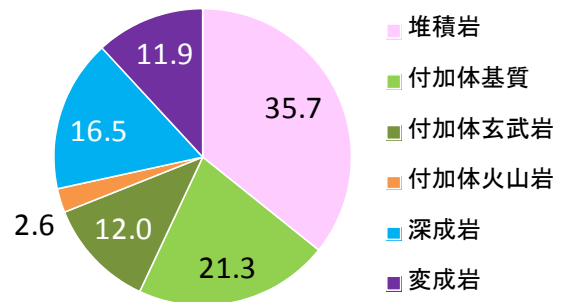


図-2 二風谷ダム流域の地質構成

の生産源の寄与はダム湖内のコア採取位置や深度によつてばらつきがあり、また、コア試料の堆積年代の推定精度が低いこともあり、降雨出水イベントごとの土砂生産源の寄与を明らかにすることはできなかった。

流域内の降雨の空間分布は降雨イベントごとに異なるため、流域内の土砂生産源も降雨出水ごとに異なるはずである。また、単一の降雨出水イベントによってダム湖に流入・堆積した土砂でも、分級作用によって粒径組成が空間的に異なる。このような降雨特性や土砂堆積特性の不均一性は、トレーサによる土砂生産源の推定結果に影響を及ぼす可能性がある。本研究の目的は、降雨出水によるダム湖への土砂堆積特性と生産源を明らかにすることである。ダム流域の地質構成に注目し、Mizugakiら⁹の方法に基づき、放射性同位体を用いて降雨出水後の堆積土砂に対する地質別の土砂生産源の寄与を推定した。また、降雨特性及び堆積土砂の粒径組成と土砂生産源の寄与との関係を検討した。

2. 方法

(1) 調査地概要

調査対象流域は北海道中央部の一級河川沙流川水系の二風谷ダム流域 (1,215 km²) とした。日高山脈に源流域をもち、複雑な地質で構成される (図-1)。堆積岩がもっとも大きな面積 (35.7%) を占め、付加体基質 (21.3%)、深成岩 (16.5%)、付加体玄武岩ブロック (12.0%)、変成岩 (蛇紋岩を含む; 11.9%)、付加体火山岩 (主に玄武岩) で構成される (図-1,2)。

年降水量は上流域で1,300 mm、下流域で1,000 mm程度である。平成22年8月11日から前線性の降雨出水があった。二風谷ダム流域平均で時間最大24 mm/h、総雨量202 mm、二風谷ダムへの時間最大流入量は約1,700 m³/sであった (図-3)。現地調査では、この降雨出水イベント後に流域内で顕著な土砂生産が確認されている (図-4)。

(2) 野外調査

ダム湖の堆積土砂は、平成22年11月にダム湖内の

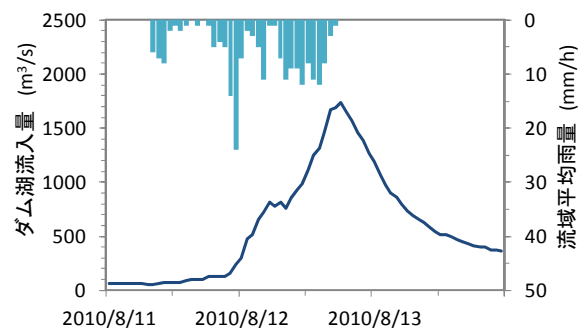


図3 二風谷ダム流域の平成22年8月降雨出水



図4 平成22年8月の降雨出水による変成岩 (蛇紋岩) 地域における土砂流出 (岡春部川; 図-1矢印)

KP0.4からKP6.0まで0.8 kmピッチで8本の横断測線を設定し、各測線の左岸側 (L)、中心 (C)、右岸側 (R) の3箇所を調査地点とした (図-5)。各調査地点において、透明アクリルパイプ (φ10×50 cm) を用いて堆積土砂 (深度30 cm~50 cm) の不攪乱試料を採取した⁸⁾。採取した土層に明瞭な層構造が見られた場合は層別に試料を分取したが、本研究では表層の試料のみを分析対象試料とした。

(3) 分析方法

各地点で採取した土砂試料の粒径組成を調べるため、粒度試験 (ふるい分析、沈降分析) を行った⁸⁾。また、土砂試料の放射性同位体を測定するため、採取した土砂試料の一部を35~40°Cで風乾した後、500 μmメッシュの

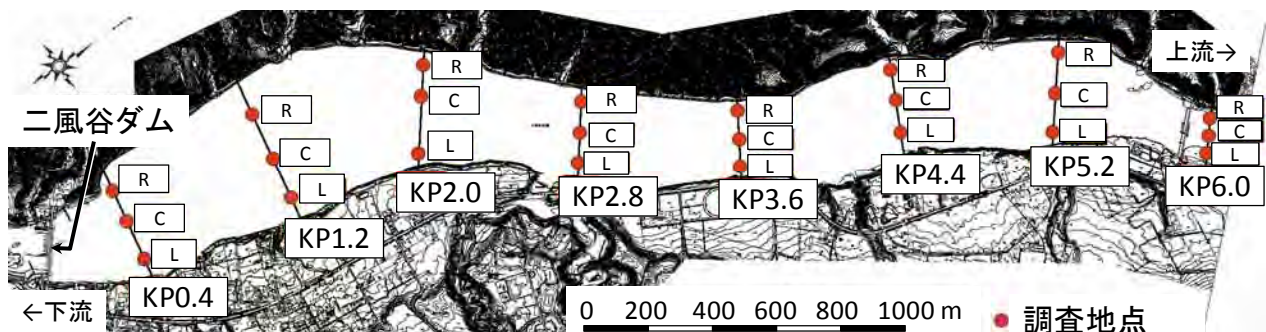


図5 二風谷ダム湖における調査地点⁸⁾

ふるいで篩別して、ポリエチレン容器（直径15 mm、高さ50 mm、容積5 ml）に充填した。密閉後21日以上静置したものをγ線測定試料とした。γ線分析は、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所の高純度Ge井戸型検出器付きγ線波高分析装置（Ortec GWL-120-15；SEIKO EG&G MCA7600）を用い、放出されるγ線を1試料につき8時間以上測定した。あらかじめ標準線源でエネルギー校正及び効率校正を行い、²¹²Pb、²²⁸Ac、⁴⁰Kの放射性同位体3各種について定量分析した^{6,7)}。

(4) 解析方法

二風谷ダム流域における降雨分布を調べるため、気象庁の全国合成レーダーデータ（1 kmメッシュ、10分雨量）を用いて、メッシュごとに平成22年8月11日～13日の総雨量及び最大1時間雨量を整理した。また総雨量及び最大1時間雨量をGIS（Esri; Arc GIS ver.9.3.1）を用いて地質ごとに整理した。

サンプル採取地点の堆積状況を把握するため、二風谷ダム湖の横断測量データ⁹⁾から、平成22年11月と平成21年11月の標高差を算出し、堆積深とした。採取したサンプルが横断測量期間中の堆積物であるかどうかを判定するため、堆積深がサンプル採取深より大きい地点は「堆積」、堆積深がプラスでサンプル採取深より小さいものは期間前の堆積物がサンプルに混入している可能性があるため「やや堆積」、堆積深が負の値の場合は「侵食」と区分した。

堆積土砂の生産源からの寄与は、Mizugakiら⁹⁾によるMahalanobisの距離に基づく寄与率の推定法を用いた。各調査地点の堆積土砂の放射性同位体特性において、各生産源土壌からのMahalanobis距離を求め⁷⁾、次式によって各生産源の寄与率を求める。

$$p_i = \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}, \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (1)$$

ここに p_i は、堆積土砂に対する生産源 i からの寄与、 d_i は堆積土砂と生産源 i とのMahalanobisの距離、 n はトレーサ数である。

3. 結果

(1) 降雨の分布特性

二風谷ダム流域における平成22年8月の降雨分布を図-6に示した。降雨イベント期間中に200 mm以上の降雨があった地域は岡春部川上流域から額平川上流域、千露呂川及びパンケヌシ川の上流域にかけて東西方向に広がっている。二風谷ダム流域全体では総雨量で124 mm

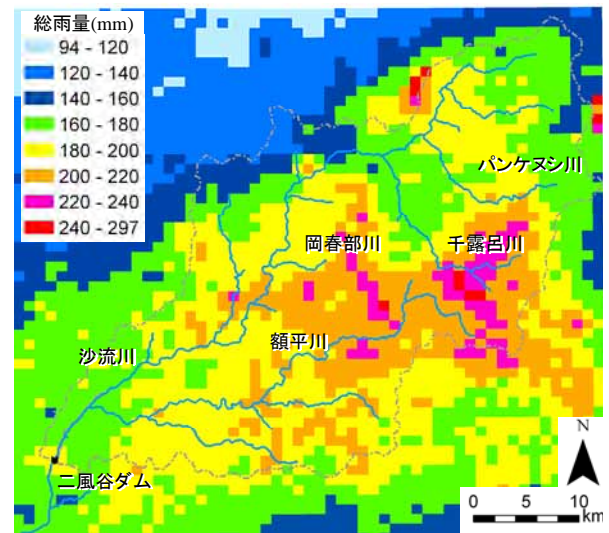


図-6 平成22年8月11-13日の降雨量の分布

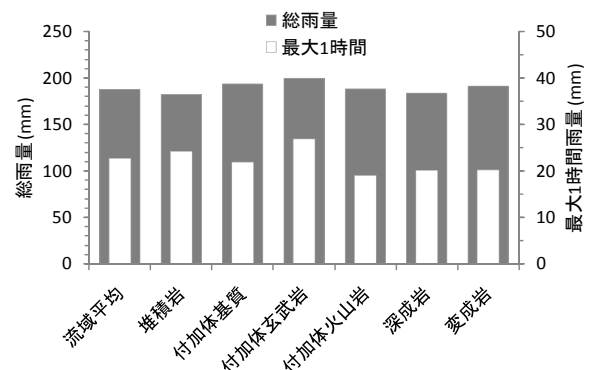


図-7 地質別の降雨分布

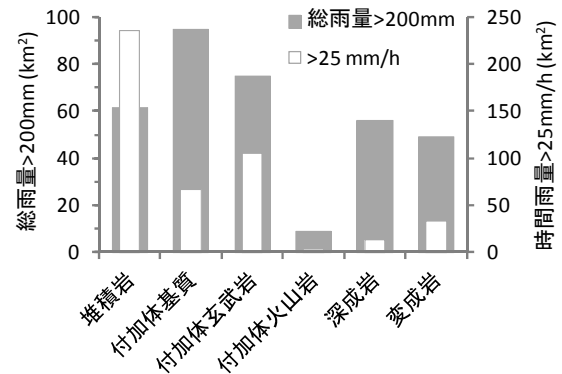


図-8 総雨量200 mm以上、時間雨量25 mm/h以上の面積

～287 mmと地域によって大きく異なっており、流域平均は188 mmであった。最大1時間雨量も11 mm/h～42 mm/hの範囲で地域によって異なり、流域平均では22.7 mm/hであった。

総雨量は地質別に大きな差は見られないが、最大1時間雨量には違いがみられ、付加体玄武岩と堆積岩で流域平均よりやや大きく、付加体火山岩、深成岩、変成岩では小さかった（図-7）。総雨量200 mm以上を観測した面積は付加体基質でもっとも大きかった（図-8）。

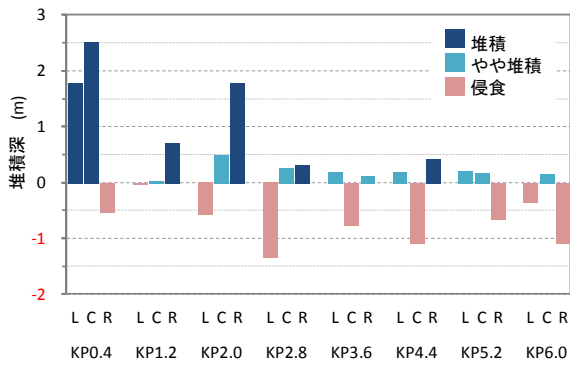


図-9 調査地点の堆積深

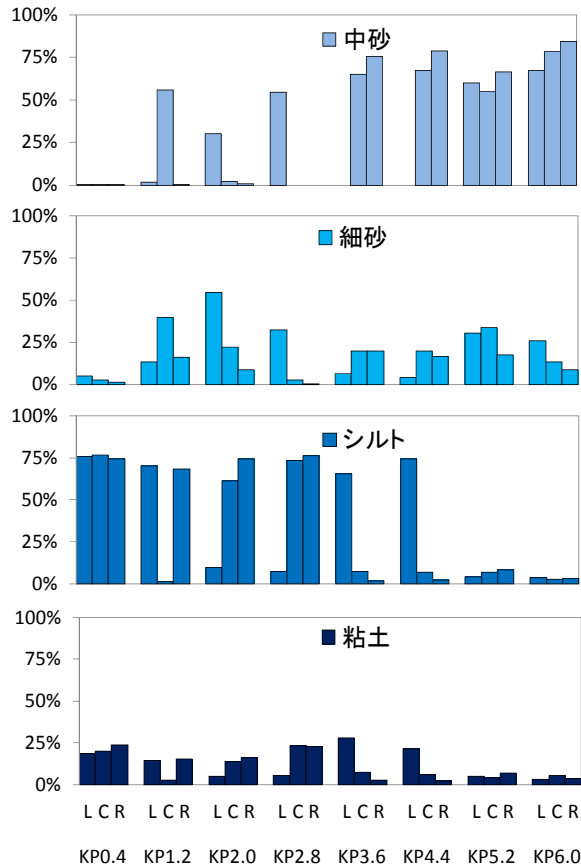


図-10 調査地点の粒径組成

(2) ダム堆積土砂の空間分布と粒径組成

平成21年11月から平成22年11月までのダム湖における土砂堆積状況は、-1.33 mから2.51 mまで、調査地点によって大きく異なっていた(図-9)。最も堆積深が大きかったのはダム堤体に近いKP0.4で2.51 mであり、上流ほど堆積深は小さくなる傾向がうかがえる。KP2.8から上流の地点では堆積深が0.4 m以下と小さく、侵食が1 m以上の地点が見られた。横断方向に見た場合、各測線に侵食箇所がみとめられ、流水の影響を強くうけていると考えられる。ダム湖内の土砂堆積は空間的に不均一性が極めて高いといえる。

堆積土砂の粒径組成も調査地点によって大きく異なっていた(図-10)。中砂の割合が60%以上と比較的高い地点はKP3.6より上流で見られた。一方、シルト分はダム

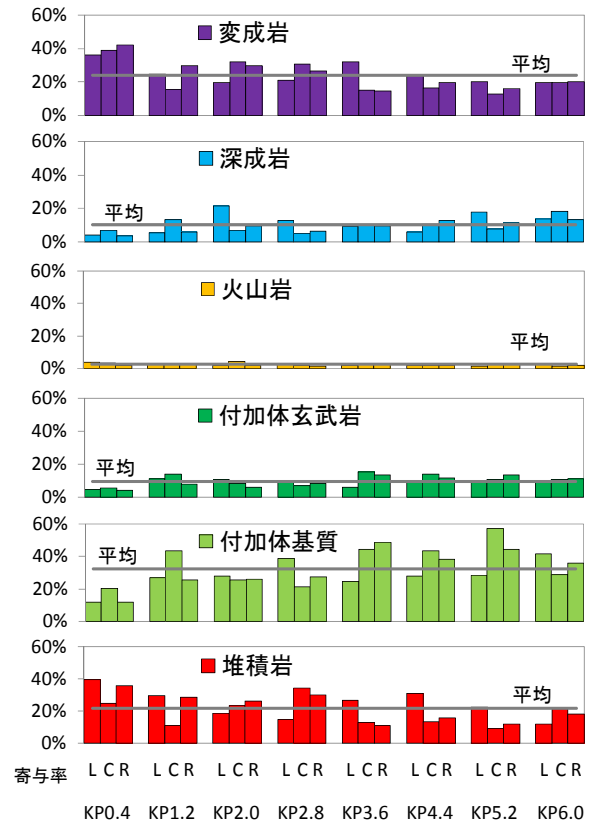


図-11 調査地点の土砂生産源の寄与

堤体に近いKP0.4においてどの地点でも多く、KP4.4付近までシルト分が70%程度と高い割合をしめる地点がみられる。粘土分はどの地点でも30%未満と少ない。

(3) ダム堆積土砂の生産源

ダム堆積土砂の生産源の寄与も調査地点によって異なっていた(図-11)。調査地点全体では付加体基質(平均値32%)、変成岩(平均値24%)、堆積岩(平均値22%)の寄与が大きく、深成岩(平均値10%)、付加体玄武岩(平均値10%)、火山岩(平均値2%)は比較的寄与が小さかった。付加体基質の寄与はダム湖の上流側で高い傾向にあり、堆積岩及び変成岩の寄与は下流側で高い傾向がみられた。また、各測線の横断方向でも生産源の寄与は異なっていた。

4. 考察

(1) 降雨分布と堆積土砂の生産源との関係

総雨量及び最大1時間雨量は付加体玄武岩でやや大きく、総雨量200 mm以上の地域(以下 R_{200})も比較的大きかったが(図-7, 8)、堆積土砂に対する寄与は小さかった(図-11)。付加体基質は最大1時間雨量25 mm/h以上の地域(以下 RI_{25})は少なかったが R_{200} は最も大きく(図-8)、生産源の寄与も最も高かった(図-11)。堆積

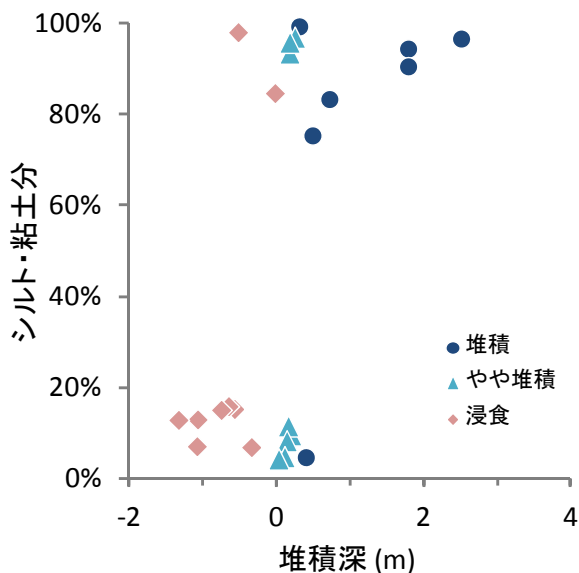


図-12 堆積深とシルト・粘土分の関係

岩では R_{200} は平均的だが RI_{25} が最も大きく (図-8)、生産源の寄与も比較的高かった (図-11)。変成岩は R_{200} 、 RI_{25} とともに堆積岩より小さいが、生産源の寄与は堆積岩と同様、比較的大きかった (図-11)。このように、地質別にみた土砂生産源の寄与は、降雨の空間分布特性と必ずしも傾向が一致しなかった。このことから、降雨のみがダム堆積土砂の土砂生産源の寄与を決定する要因ではなく、その他の要因の影響が示唆される。

(2) ダム湖の土砂堆積特性

ダム湖内の土砂の堆積深や粒径組成は、ダム堤体からの距離によって異なる傾向が認められた (図-9,10)。ダム湖の上流側ほど堆積量は少なく、侵食傾向が目立ち、ダム堤体に近いところで顕著な堆積が認められた (図-9)。またダム湖の上流側から堤体に近くなるにつれて粒径が小さくなる傾向があった。堆積土砂の粒径特性をみると、堆積深が大きいほど微細土砂分 (シルト・粘土分) の割合は75%~99%と大きく、侵食箇所では20%未満と小さい傾向が見られた (図-12)。

河川水は貯水池に流入すると流速が減少し、流入土砂は分級作用によって粒径の大きな粒子から堆積していくため、貯水池の上流側に中砂が多く、ダム堤体に近いほど微細土砂が多くなったと考えられる。また、一般に微細土砂成分 (シルト・粘土分) はウォッシュロードと呼ばれ、流域の山地斜面や溪岸から流水中に供給されると、河床材料とは交換せず、一気に下流へと輸送される。平成21年11月から平成22年11月の間にダム湖に流入・堆積した土砂の多くがウォッシュロードであり、また、侵食した地点はかつて堆積したウォッシュロードが再移動により失われた可能性がある。とくに粘土分の割合は比較的低いことから (図-10)、出水時にダム下流へと流下

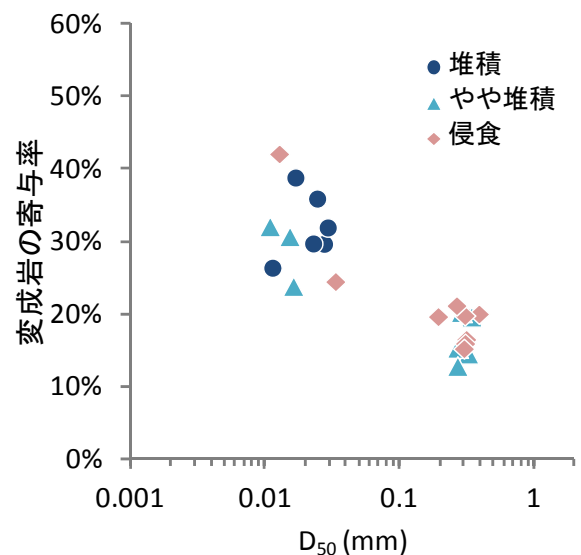
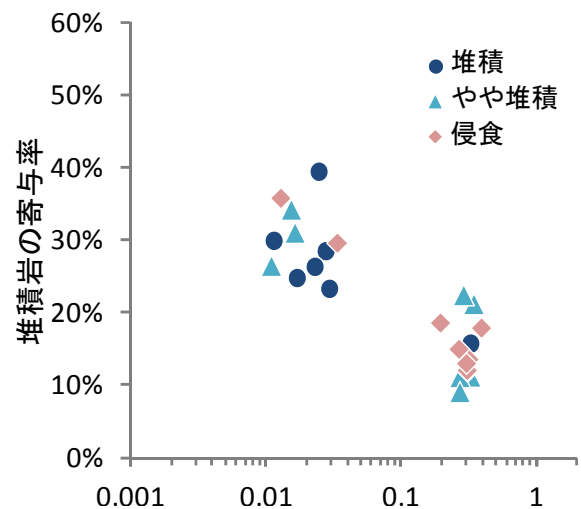
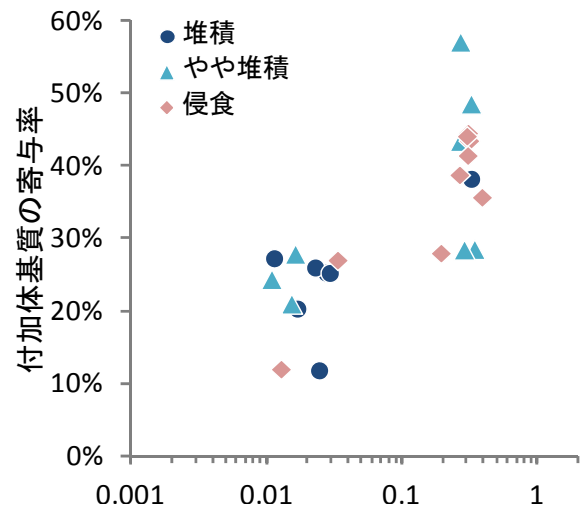


図-12 堆積深とシルト・粘土分の関係

しているものと推測される。

(3) ダム湖の堆積土砂と生産源との関係

ダム堆積土砂の生産源として付加体基質、堆積岩及び変成岩の寄与が大きく、それらはダム堤体の距離によ

て異なる傾向が認められた(図-11)。堆積深や粒径組成がダム堤体からの距離によって異なることから、これらが土砂生産源の寄与に影響を及ぼしている可能性がある。そこで、堆積土砂の50%粒径(D_{50})と生産源の寄与との関係を見ると、付加体基質は D_{50} に対して明瞭な増加傾向が、堆積岩及び変成岩では減少傾向が認められた(図-13)。この傾向は、いずれの生産源の寄与についても、堆積深にかかわらず認められた。

これらのことから、ダム堆積土砂の生産源は、流域の降雨特性よりも、むしろ堆積土砂の粒径によって特徴づけられることがわかった。すなわち、「堆積」地点の堆積土砂はウォッシュロード(シルト・粘土分)が高い割合を占め、生産源として堆積岩及び変成岩の寄与が高い。一方「侵食」地点では浮遊砂(中砂)が高い割合を占め、付加体基質の寄与が高い。流域からの流出土砂は、その粒径画分によって生産源となる地質(岩石)地域が異なる可能性を示している。

5. おわりに

ダム流域の土砂生産源を明らかにするため、放射性同位体トレーサを用いて堆積土砂の生産源を推定した。また、ダム流域の降雨分布とダム湖の土砂堆積特性を調べ、土砂生産源との関係を検討した。その結果、ダム湖に流入・堆積した土砂の生産源は、堆積土砂の粒径によって異なることが明らかとなった。流域一貫した土砂管理における多目的ダム管理では、土砂生産源対策とともに、サンドバイパスや濁水対策など、堆積土砂の粒径を考慮した適切な処理がもとめられている。本研究で得られた知見は、管理対象とする土砂の粒径に応じて土砂生産源対策の優先順位をつけるなど、具体的な流域土砂管理計画への利用が期待される。

謝辞：国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部治水課及び二風谷ダム管理所には、二風谷ダム湖の堆積土砂試料及び各種報告書・データを提供いただきました。また(独)土木研究所寒地土木研究所水環境保全チームの久保まゆみ氏には雨量データ整理のご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 1) たとえば村上泰啓. 2008. 航空レーザー測量結果を用いた沙流川流域の微地形判読と基盤岩の土砂生産特性について. 河川技術論文集 14: 127-132.
- 2) 田中治雄, 石外宏 (1951) 貯水池の堆砂量と集水区域の地形及び地質との関係について (第1報). 土木学会誌 36: 173-177
- 3) 江崎一博 (1966) 貯水池の堆砂に関する研究. 土木研究所報告 129: 1-29
- 4) 岡野眞久, 高柳淳二, 藤井隆弘, 安藤明宏 (2004) ダム貯水池流入土砂量に基づく堆砂管理についての考察-土砂生産量強度マップの開発の事例-. ダム工学 14: 167-176
- 5) たとえば Yeager KM, Santschi PH, Phillips JD, Herbert BE (2002) Sources of alluvium in a coastal plain stream based on radionuclide signatures from the ^{238}U and ^{232}Th decay series. Water Resources Research 38: 1242-
- 6) Mizugaki S, Abe T, Murakami Y, Maruyama M, Kubo M. 2012. Fingerprinting suspended sediment source in the Nukabira River, northern Japan. International Journal of Erosion Control Engineering (in review)
- 7) 丸山政浩, 水垣滋, 村上泰啓: 放射性同位体トレーサを用いたダム湖の土砂生産源推定. 平成 22 年度北海道開発局技術研究発表会論文集. 2011 年 2 月 23 日. GT-14
- 8) 室蘭開発建設部二風谷ダム管理所・福田水文センター. 2011. 平成 22 年度二風谷ダム貯水池水質調査業務報告書.
- 9) 室蘭開発建設部二風谷ダム管理所・大開技術コンサルタント. 2011. 平成 22 年度二風谷ダム貯水池大横断測量業務報告書.