

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

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

流域土砂管理において浮遊土砂生産源の空間分布を的確に把握することは極めて重要である。浮遊土砂が堆積するダム湖の堆積資料は流域の土砂流出量の推定に有用であるが、生産源の空間分布を把握するのは困難である。本報では、二風谷ダム湖の堆積土砂を対象に、従来、把握困難であった生産源について放射性同位体トレーサを用いた推定結果を報告する。ボーリングコア試料の放射性同位体特性から地質別に土砂生産源を区分し、堆積土砂に対する生産源の寄与を推定した。堆積土砂の生産源と降雨の地質別の分布との関係から、放射性同位体トレーサによる生産源推定法の有効性について検討した。

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⁾、その生産源と土砂供給量を把握することは、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。

一般的に生産源からの土砂流出量は、山地上流域の治山ダムや砂防ダムの堆積データをもとに推定されるのが一般的であるが、貯蓄される土砂の大半が砂礫で構成されており、浮遊土砂の把握は困難である。多目的ダムといった貯水池の大きなダムでは浮遊土砂が堆積し、貯水容量を圧迫するため、ダム管理上、流域の土砂流出量の把握が重要課題である。ところが、流域面積が大きいことや、浮遊土砂の挙動を流砂量式で推定することができないことから、生産源の空間分布を把握することは困難である。

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。これまでも河床材料²⁾や海岸砂³⁾を対象に岩石や鉱物、元素組成をトレーサとした粗粒砂礫の生産源推定がなされてきたが、浮遊土砂についてはほとんど調べられてこなかった。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⁴⁾。放射線量は岩石によって異なることが知られており⁵⁾、天然放射性同位体を用いて異なる地質の浮遊土砂生産源を判別できる可能性がある。日本においても森林山地流域を対象に放射性降下物をトレーサとした事例が報告されており⁶⁾、放射性同位体のトレーサとしての有効性が示されている。これらのトレーサ手法を、水文・堆積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。

本研究の目的は、ダム湖の堆積した浮遊土砂の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、放射性同位体を用いて浮遊土砂トレーサを探索し、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、土砂生産の誘因となる降雨量を地質別に整理し、推定された地質別の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) 及び鶴川流域 (1,270 km²) とした。ともに日高山脈に源流域をもち、複雑な地質で構成される (図-1)。年降水量は上流域で1,300 mm、下流域で1,000 mm程度である。

2003年8月に台風10号により既往最大の降雨出水イベントがあり、二風谷ダム (1998年3月完成) の最大流入

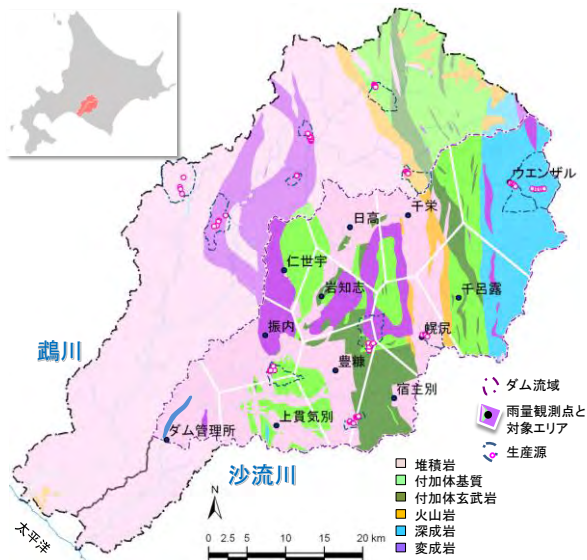


図-1 調査地概要

表-1 二風谷ダム流域の主な降雨出水イベント

	最大 流入量* ($m^3 s^{-1}$)	降水量 (流域平均)		
		総雨量 (mm)	時間最大 雨量 (mm)	総降雨 時間 (h)
1998/8/28	743	142	14	32
1999/7/31	1,320	242	9	78
2001/9/11	1,945	232	13	41
2003/8/10	6,352 (6,100)	284	36	50
2006/8/19	3,411	305	30	25

*ダム諸量データベース (<http://www2.river.go.jp/dam/>) による。

() 内はフーリエ解析による公表値。

量は $6,000 m^3 s^{-1}$ を上回った(表-1)。流域では崩壊が多発し、大量の土砂が生産・流出し、裸地が形成された。ダム完成以降の最大流入量を見ると、1998年8月、1999年7月、2001年9月、2003年8月、2006年8月に大きな降雨イベントがあった(表-1)。

(2) 野外調査

異なる地質における生産源土壌の放射性同位体を調べるため、GISと20万分の1日本シームレス地質データベース⁷⁾を用いて13の小流域を調査地とし(図-1)、崩壊裸地斜面の表層約5 cmから土壌試料を採取した。ダム湖堆積土砂は、2008年6月にダム湖内の3地点(ダムより上流2.0 km、3.6 km、4.4 km)で採取されたボーリングコア試料⁸⁾の一部を深度別に17~20試料を分取した(図-2)。

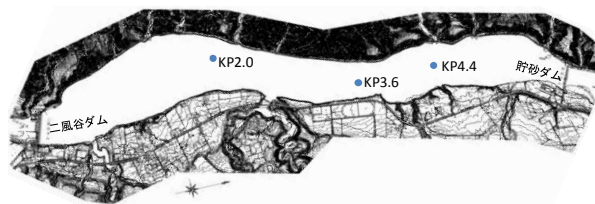


図-2 ボーリングコア採取地点

(室蘭開発建設部二風谷ダム管理所・日本工営⁸⁾を改変)

(3) 分析方法

採取した土砂試料は、35~40°Cで風乾した後、生産源土壌については500 μm メッシュのふるいで篩別して、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、試料の測定結果から天然放射性同位体のウラン-238系列、トリウム-232系列、ウラン-235系列、カリウム-40、及び人工放射性同位体セシウム-137と放射性降下物の過剰鉛-210の13種類について定量分析した。

(4) 解析方法

生産源を区分できる有効トレーサの組合せを調べるため、生産源土壌の採取地点を、地質図により3種類の基準(地質時代、岩石、小流域)で分類した(表-2)。異なる基準の分類グループを判別できるトレーサの組合せを抽出するため、Wallingら⁹⁾の統計解析方法にしたがいKruskal-Wallis検定及び判別分析を行った。

表-2 生産源の地質区分

小流域	時代	岩石
M4	時代未詳	変成岩(蛇紋岩)
M5	後期白亜紀後半	堆積岩
M6	ジュラ紀-前期白亜紀	変成岩
M7	後期ジュラ紀-前期白亜紀	付加体火山岩
M8	ジュラ紀-前期白亜紀	変成岩
M10	前期白亜紀前半-後期白亜紀後半	付加体基質
S2	後期白亜紀後半	堆積岩
S3	二疊紀-後期ジュラ紀後半	付加体玄武岩
S10	中期始新世-中期漸新世	堆積岩
S11	後期ジュラ紀-前期白亜紀前半	付加体基質
S12	後期白亜紀前半	堆積岩
S14	前期始新世-中期始新世	深成岩
S15	前期中新世	深成岩

堆積土砂の生産源からの寄与を推定するために、各生産源グループと堆積土砂とのMahalanobisの距離を計算した。Mahalanobisの距離は、各生産源のトレーサ濃度について平均値と分散を考慮した距離の概念であり、堆積土砂との距離は、以下の式で与えられる。

$$d_i^2(c_1, c_2, \dots, c_j) = (c_1 - C_{i1} \quad c_2 - C_{i2} \quad \dots \quad c_j - C_{ij}) \begin{bmatrix} S_1^2 & \dots & S_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{j1} & \dots & S_j^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} c_1 - C_{i1} \\ c_2 - C_{i2} \\ \vdots \\ c_j - C_{ij} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに d_i は生産源 i と堆積土砂とのMahalanobisの距離、 c_j は堆積土砂のトレーサ j 濃度、 C_{ij} は生産源 i におけるトレーサ j の平均濃度、行列式は各トレーサ間の共分散逆行列である。

堆積土砂の生産源からの寄与は、Mahalanobisの距離が短いほど大きく、距離が長いほど寄与が小さいと考えられる。そこで本報では、生産源からの寄与が距離の逆数に比例するもの仮定し、以下の式で各生産源からの寄与を算出した。

$$p_i = \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}, \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (2)$$

ここに p_i は、堆積土砂に対する生産源からの寄与である。

推定された生産源の寄与の妥当性を検討するために、土砂流出の指標として地質別の降雨量分布を調べた。降雨量は、ダム流域内の12地点で観測されている北海道開発局の雨量データ(1998~2007)を用いた(表-3)。観測所の対象範囲をGIS(ESRI; ArcGIS Ver. 9.3.1)を用いてThiessen法により分割して決定し、地質構成を調べた(図-1、表-3)。観測所の雨量(mm)を地質面積を乗じて降水量(m^3)を算出し、ダム流域全体で地質ごとに集計した。

表-3 Thiessen法で区分した雨量観測所の対象面積

雨量観測所	対象面積	堆積岩	付加体基質	火山岩	深成岩	変成岩	付加体玄武岩
ウェンザル	193.9	0.0	34.6	0.0	145.5	11.5	2.2
千栄	110.2	50.1	21.7	12.0	0.0	11.0	15.4
千呂露	155.1	15.6	50.0	12.6	54.2	4.6	18.1
日高	88.8	55.4	15.6	0.0	0.0	13.2	4.6
岩知志	79.5	16.9	23.4	0.0	0.0	27.5	11.2
仁世宇	60.2	0.8	30.7	0.0	0.0	28.6	0.0
振内	96.5	62.8	7.7	0.0	0.0	24.4	0.5
幌尻	85.4	32.9	18.7	7.1	0.0	18.3	8.3
豊糠	109.0	58.3	21.7	0.0	0.0	3.3	25.6
宿主別	77.8	17.2	1.4	0.0	0.0	0.0	59.3
上貫気別	99.0	65.0	32.6	0.0	1.0	0.0	0.2
ダム管理所	61.2	58.9	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0
ダム流域	1,216.3	433.8	258.0	31.7	200.7	144.2	145.5
(%)		35.7	21.2	2.6	16.5	11.9	12.0

3. 結果

(1) 生産源の同位体特性と有効トレーサ

定量分析を行った13種の放射性同位体についてKruskal-Wallis検定を行った結果、8~10種の放射性同位体についてグループ間で有意差が認められた。有意差が認められた同位体を対象に判別分析を行ったところ、正答

率が最も高かったのは岩石を基準に区分した6つのグループをPb-212、Ac-228及びK-40を用いて判別した場合(72.2%)であった。これらの3つの天然放射性同位体について岩石グループごとに比較すると、Ac-228の変成岩にやや外れ値が多いものの、グループ間で濃度差があることがわかる(図-3)。このように、3つの放射性同位体を組み合わせることで6つの岩石地域(堆積岩、付加体基質、付加体玄武岩、火山岩、深成岩、変成岩)を生産源とした土砂の有効トレーサとなる可能性が示された。

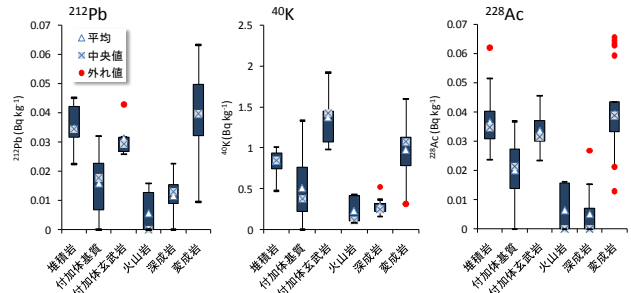


図-3 岩石ごとの放射性同位体特性

(2) ダム湖堆積土砂の生産源

ダム湖堆積土砂の生産源からの寄与を推定するため、Pb-212、Ac-228及びK-40をトレーサとして、式1および2を用いて、岩石で区分した6つの生産源からの寄与を算出した。図-4に、KP4.4のコア試料の柱状図と分析試料の位置及び年代、生産源の寄与を示す。堆積土砂の生産源は、堆積岩、付加体基質、変成岩の寄与が大きく、付加体玄武岩、深成岩、火山岩の寄与が小さい傾向がみられるが、それらの割合は層序によって異なっている。堆積岩の寄与は概ね20%以上であるが、表層から0.5 m、0.75 m、3.3 m、3.55 m及び3.8 mは堆積岩の寄与が小さく、付加体基質の寄与が大きくなっている。これらの層は共通して中粒砂から粗粒砂の比較的粒径が大きい土砂で構成されている。また、表層から2.45 mでは変成岩の寄与が40%以上と最も大きく、柱状図でみると泥層に対応している。

KP3.6について見てみると、KP4.4と同様に堆積岩、付加体基質、変成岩の寄与が大きい傾向が見られたが、深成岩の寄与がKP4.4に比べて大きい(図-5)。寄与の割合の変化はKP4.4ほど大きくないが、表層から2.6 mに変成岩の寄与が約50%と大きい特異な層は、KP4.4と類似しており、シルト層の粒径の小さい土砂で構成されている。堆積岩の寄与が10%と小さい1.7 mの層が粗粒砂で構成されている点もKP4.4と類似している。

KP2.0でも他の地点と同様に、堆積岩、付加体基質、変成岩の寄与が大きい(図-6)。表層から3.1 mに変成岩の寄与が約50%と大きい特異な層があり、粒径の小さい土砂で構成されていることも他の地点と共通している。表層4.75 mでは堆積岩の寄与が約60%と極めて大きく、これも粒径の小さい土砂で構成されている。

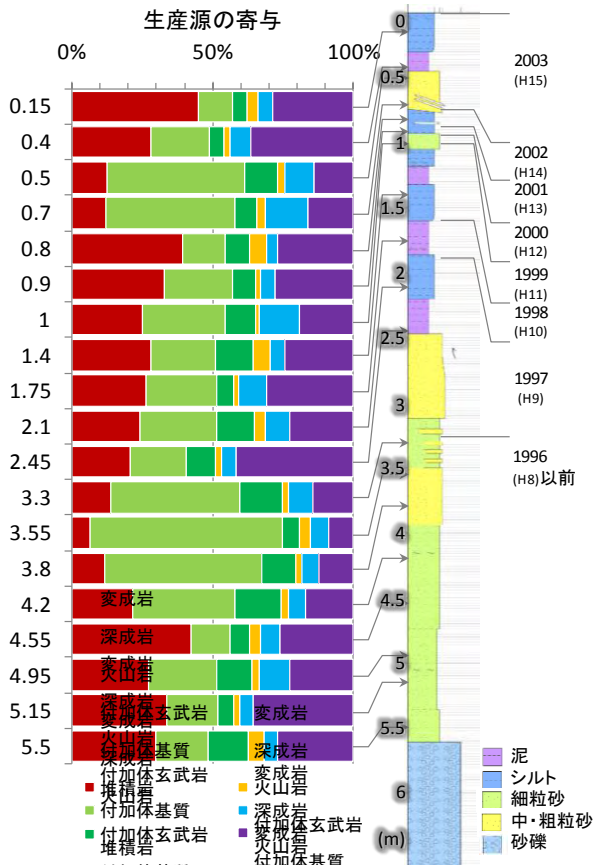


図4 KP4.4の上砂生産源の寄与ボーリングコア柱状図
(柱状図は室蘭開発建設部(加藤)管理所・日本工営®を改変)

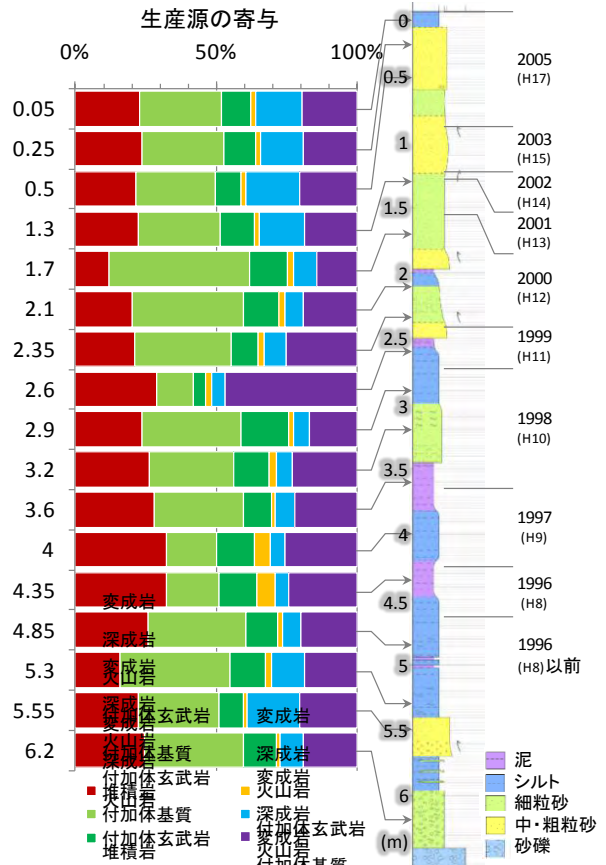


図5 KP3.6の上砂生産源の寄与ボーリングコア柱状図
(柱状図は室蘭開発建設部(加藤)管理所・日本工営®を改変)

(3) 地質別にみた降雨特性

斜面から河道への土砂生産・流出には、降雨が主な営力となる。したがって、降雨の時空間的な不均一性は、土砂生産・流出の空間分布にも影響を及ぼす可能性がある。1998年から2007年までの年間降雨量を地質別に整理したところ、若干の割合の変化はみられるものの、流域の地質面積割合とほぼ同じといえる(図-7)。

大規模な出水をもたらしたイベントの総雨量についても地質別にみると、1999年7月のイベント時は深成岩でやや多いが、イベントによる明瞭な違いは見えなかった(図-8)。しかし、ある降雨強度以上の降水量について地質別に整理したところ、イベントによって異なる特色が見える(図-8)。降雨強度10 mm/h以上の降水量は総雨量と傾向は変わらないが、降雨強度15 mm/h以上の降水量について、1999年は深成岩地域で降水量が最も多く、その他のイベントでは堆積岩地域で降水量が最も多いことがよくわかる。また1998年と2001年では深成岩地域で少ないが、2003年と2006年は深成岩地域でも10%前後の降水がある。降雨強度20 mm/h以上の降水量について、1999年は20 mm/h以上の降雨が見られなかったが、その他はいずれのイベントでも堆積岩、付加体基質の地域で多く降っており、1998年は変成岩地域で降水量が多い。降雨強度25 mm/h以上の降水量では、よりイベント

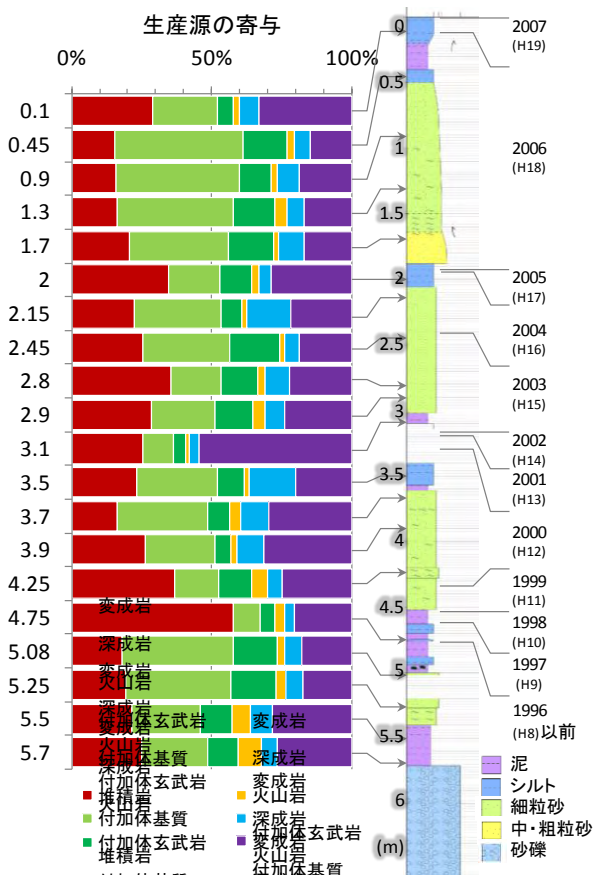


図6 KP2.0の上砂生産源の寄与ボーリングコア柱状図
(柱状図は室蘭開発建設部(加藤)管理所・日本工営®を改変)

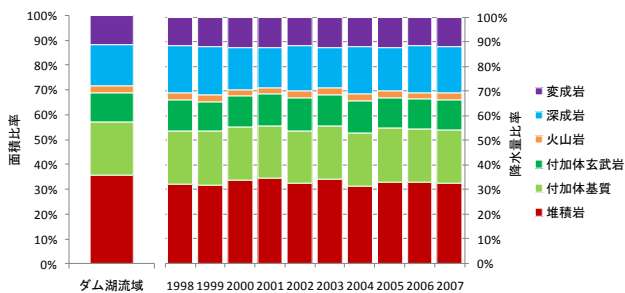


図-7 面積と年降水量の岩石別比率

ごとの特徴が明瞭であり、1998年では変成岩地域で30%以上と他のイベントに比べて多く、堆積岩、付加体基質とはほぼ同量ずつ降っている。2001年は大半が堆積岩地域で降っており、2003年と2006年は降水量の15%、10%が付加体玄武岩地域でも降水が認められるほか、深成岩、火山岩地域でも降水があった。このように、イベントによって降雨強度の大きい集中した降水がもたらされる地質地域が異なることから、流出土砂の生産源もイベントごとに異なる可能性が示唆される。

4. 考察

(1) 降雨分布と堆積土砂の生産源との関係

ダム完成以降の主要な降雨流出イベントについて、地質（岩石）ごとの降水量を降雨強度別に整理したところ、降水量の多い岩石地域はイベントによって異なることがわかった（図-8）。このような降雨分布の違いは、ダム湖への流入土砂がイベントごとに異なる地域から生産されている可能性がある。

そこで、ボーリングコアに堆積年代を挿入し、ダム堆積土砂の生産源と降雨分布との関係を調べた。堆積年代は、ボーリングコアの柱状図と毎年1~2回実施されている横断深浅測量結果⁹⁾との対応から決定した。1998年8月の降雨イベントは変成岩地域で降雨強度の大きい降水が多かったが、1998年の堆積土砂に対する変成岩の寄与はKP4.4及びKP3.6でそれぞれ31%及び17-23%であり、とくに変成岩の寄与が高かった層とは一致しなかった（図-4, 5）。1999年7月イベントでは深成岩地域での降水が多かったが、KP4.4とKP3.6の堆積土砂における深成岩の寄与は5%と低い（図-4, 5）。2001年9月イベントでは堆積岩地域で強度の大きい降水が集中したが、KP4.4とKP3.6の2001年の堆積土砂に対する堆積岩の寄与はそれぞれ33%、22%と、他の層に比べてとくに高い傾向は認められない（図-4, 5）。2003年8月及び2006年8月のイベントでは、付加体玄武岩や深成岩地域でも降雨強度の大きい降水が多かったが、KP4.4とKP2.0の2003年堆積土砂に対する付加体玄武岩の寄与はそれぞれ5-12%、4-18%とそれほど目立った傾向はない（図-4, 6）。しかし、KP2.0の2006年堆

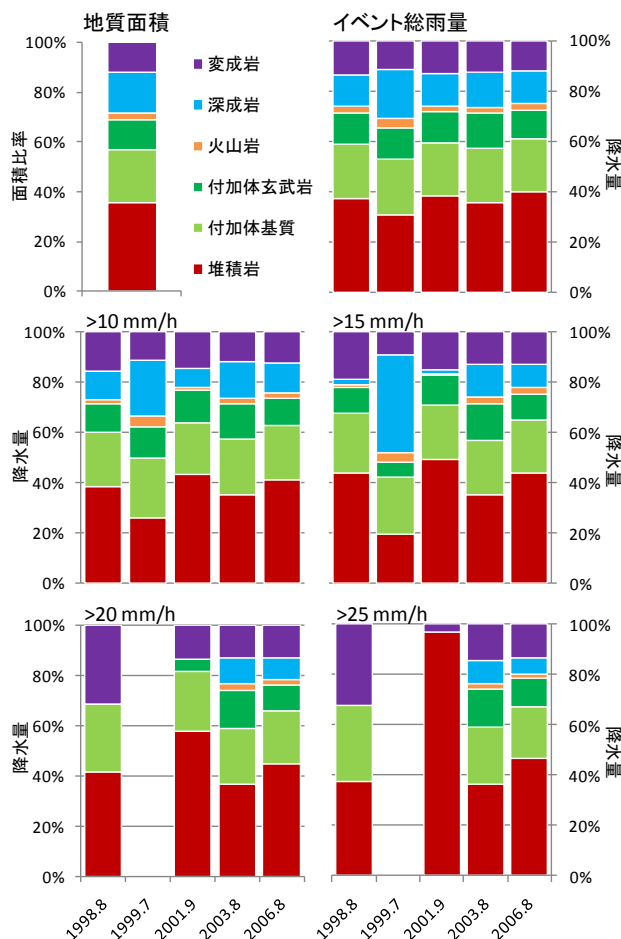


図-8 イベント降水量の岩石別比率

積土砂では、付加体玄武岩が11-16%と比較的大きな寄与がみられた（図-6）。深成岩の寄与については、KP4.4の2003年堆積土砂（0.7m）で15%と大きな寄与を示したが（図-4）、KP2.0では5-9%と平均的な寄与であった（図-6）。

このように、生産源の寄与と岩石別の降水量との関係は、部分的には一致したものの、必ずしも一致しなかった。これは、降雨以外のさまざまな土砂流入・堆積に関する要因が複雑に関与しているためと考えられる。一般にダム湖への流入土砂は、降雨や地質のみならず、崩壊地や地すべりの分布といった土砂生産源の条件、流域面積や傾斜などの地形条件、堆積土砂の粒径や流量、河床勾配等の土砂輸送条件などが影響する¹⁰⁾。さらに、ダム湖内の土砂堆積は空間的に不均一であり、また堆積土砂の再移動により、流域において土砂が生産・流出した年代とコア試料にみられる堆積年代とにずれが生じる可能性も考えられる。

(2) ダム流域の土砂生産源

降雨出水イベント時の強雨による降水量の地質別分布はイベントごとに異なっていたが（図-8）、堆積土砂の生産源との関係は不明瞭であった。しかし、年降水量の地質別比率は長期的にほぼ一定であり、流域の地質構成

に依存していることから、ダム堆積土砂の生産源比率も地質に影響を受けている可能性がある。

そこで、3地点の全分析対象試料について生産源寄与を単純に算術平均し、流域面積と降水量（m³）の地質別比率の平均値（1998～2007年）との関係を調べた（図9）。その結果、堆積岩、深成岩は面積・降水量のわりに生産源の寄与が低く、付加体基質、変成岩は生産源の寄与が高かった。2003年8月の降雨出水イベント時には、二風谷ダムの左岸に流入する額平川流域において崩壊が多発しており、とくに付加体基質や変成岩地域で高密度に崩壊が発生したことが報告されており¹⁾、これらの地域で生産源の寄与が高く推定されたことと一致する。また、付加体基質の崩壊土砂は細粒化しにくく、一方、変成岩（蛇紋岩）の露頭から粘土状の土砂が河川に流入していることが確認されていることから¹⁾、3地点のコアに共通してみられた付加体基質や変成岩の寄与と粒径との関係を支持している。このように、ダム堆積土砂の生産源の寄与は、流域の地質による土砂生産特性の違いを反映しており、放射性同位体が生産源推定の有効なトレーサであることを示している。

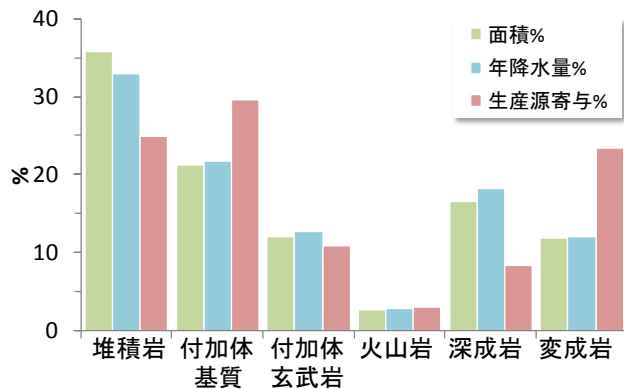


図9 地質別の面積、年降水量および土砂生産源寄与の比率
(年降水量は冬季12～3月を除く)

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による土砂生産源推定手法を構築した。土砂生産源を岩石により6区分し、生産源の寄与を推定した。流域面積や降水量の地質別比率と生産源の寄与との関係は、降雨出水イベント時の堆積土砂については不明瞭であったが、年平均的な土砂生産源の寄与との関係から、地質による土砂生産の違いが示された。これらは既往研究による流域の土砂生産・流出特性からも支持され、放射性同位体トレーサの有効性が示された。今後、ダム流域の過去の土砂生産・流出情報を定量的に把握するには、堆積年代の精度向上、湖内の堆積土砂の挙動の把握、

多地点・全深度での放射性同位体特性、流域水文特性を考慮した定量的検討などが必要であろう。

6. 謝辞

国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部治水課、二風谷ダム管理所、沙流川ダム建設事業所、及び苫小牧河川事務所には、二風谷ダム湖のボーリングコア試料、雨量・水文データ等を提供いただいたほか、本稿に対して貴重なコメントをいただきました。また、現地調査について株式会社福田水文センターにご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

7. 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) たとえば大石哲, 砂田憲吾, Sisinggih D, 宮沢直季. 2010. 鉱物組成を用いた富士川流域における土砂生産源推定に関する基礎研究. 水工学論文集 54: 673-678.
- 3) たとえば福山貴子, 松田武久, 佐藤慎司, 田中晋. 2003. 湘南海岸流砂系の土砂動態と相模川河口地形の変化. 海岸工学論文集 50: 576-580.
- 4) 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 ²³⁸U and ²³²Th decay series. Water Resources Research 38: 1242-
- 5) 松田秀晴, 湊進. 1999. 日本における主な岩石中の放射能. Radioisotopes 48: 760-769.
- 6) たとえば Mizugaki S, Onda Y, Fukuyama T, Koga S, Asai H, Hiramatsu S. 2008. Estimation of suspended sediment sources using Cs-137 and Pb-210(ex) in unmanaged Japanese cypress plantation watersheds in southern Japan. Hydrological Processes 22: 4519-4531.
- 7) 産業技術総合研究所地質調査総合センター. 2010. 20万分の1日本シームレス地質図データベース 2010年2月1日版. 産業技術総合研究所研究情報公開データベース DB084.
- 8) 室蘭開発建設部二風谷ダム管理所・日本工営. 2008. 平成20年度二風谷ダム貯水池堆積物調査業務報告書.
- 9) Walling DE, Owens PN, Leeks GJL. 1999. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK. Hydrological Processes 13: 955-975.
- 10) 新谷融, 黒木幹男. 2001. IV.2 流域土砂動態の予測. 新谷融・黒木幹男 (編) 流域動態の認識とその方法. 北海道大学図書刊行会. 札幌. p. 200-223.