

河川流況および地すべり地形に着目した ダム上流域における土砂流出に関する考察

DISCUSSION ON SEDIMENT RUNOFF FROM DAM WATERSHEDS
WITH PARTICULAR REFERENCES ON THEIR HYDROLOGICAL REGIMES
AND LANDSLIDE TOPOGRAPHYS

田代 喬¹・白垣裕美子²・辻本哲郎³

Takashi TASHIRO, Yumiko SHIRAGAKI and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 名古屋大学大学院准教授 環境学研究科都市環境学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町一番地)

²学(工) 名古屋市 緑政土木局緑土木事務所(〒458-0825 名古屋市緑区左京山3027-1)

³フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

Sediment runoff from upper watershed of dam is dependent on its landscape characteristics (topography, geology and etc.) and its hydrological regimes. In the present study, we collected the practical data (sediment deposit and inflow regime) about 11 dam reservoirs located in the Ise Bay basin and analyzed the geologic and topographic characteristics of their watershed with the GIS (Geographical Information System) techniques. By combining the following variables such as total area, relief, perimeter, landslide topographic area and inflow discharge in watershed, the each of sediment deposits in these dam reservoirs could be quantitatively evaluated. According to these results, it has been clarified that the landslide topography could have been applicable as one of the new index for sediment runoff evaluation.

Key Words : *Sediment runoff, dam watershed, reservoir deposit, Geographical Information System, hydrological regime, landslide topography*

1. はじめに

ダム上流域における土砂流出については、素因として地形・地質などの流域特性、誘因として上流域における水文現象に起因する流砂発生メカニズムが大きく寄与していることが想定される。しかしながら、ダム貯水池における(平均)年比堆砂量の推定方法を考察した竹林ら¹⁾が指摘しているように、流域特性量や水量を説明変数とする既存の堆砂量推定式の適合性は総じて低く、異なる推定式間の相関性も見当たらない。これらの齟齬は、既存の推定式に限られたサンプルを対象として構築されたものであることが一因とされている¹⁾。これに対し、全国河川の貯水池における堆砂量を考察した芦田・奥村²⁾は、地域的に異なる傾向を示しながら流域面積の0.7乗に比例して比堆砂量が減少する関係を見出しており、流域特性を類型化したうえでの解析の有効性を示唆している。これらを踏まえて、今日の多目的ダムの堆砂計画

においては、近傍の類似ダムの堆砂実績から堆砂量が推定されているに過ぎない³⁾。既往の推定式が利用されない理由として、精度の低さに加え、現象の複雑さゆえに推定式の適用範囲が明記できないことが挙げられるが³⁾、ダム堆砂問題を含む土砂流出現象の解明には、河川技術として解決すべき課題が山積している状況にある。

このように複雑かつ難解な過程を含む、土砂流出現象について、確率過程として解析すべきとする提言もある¹⁾。しかしながら、降雨・流出などの水文現象、直接流水によらない地すべりなどの地表変動現象、上流河川における移動床現象といった異質のプロセスが複合しているため、土砂流出の適切な理解には、関連する素過程を系統的に分離して体系化することが必要であろう。そこで本研究では、ダム上流域における土砂流出を対象とし、貯水池における年堆砂量と上流域における流況変動、地すべり地形を含む流域特性の相互関係を系統的に考察すること、さらには、山地河川流域における高精度な土砂流出量推定式の構築を目的とする。

2. 材料と方法

(1) 対象流域

田代ら⁴⁾と同様に、日本列島の中央に位置する伊勢湾流域圏内において、貯水池の規模が一定以上（総貯水容量 1.5×10^7 (m³)以上）で、上流に同等規模のダムが無いダム（合計11基）の集水域を対象とした。ただし、上流ダムの竣工年が当該ダムの竣工年より新しい場合、上流ダム建設以前のデータは含めた。対象流域と各ダムの位置を図-1に、各ダムの概要を表-1に示す。なお、図-1には、表層地質図（独産業技術総合研究所地質調査総合センターより元データ提供）も併せて示す。

これらの対象流域における表層地質、土地被覆、地形特性を統計的に分析した田代ら⁴⁾は、流域特性は表層地質によって特徴づけられることを明らかにした。具体的には、深成岩類が占める阿木川ダム、羽布ダム、矢作ダム、君ヶ野ダムの各流域（第1群）、火山岩類が占める宇連ダム、岩屋ダム、高根第一ダム、朝日ダムの各流域（第2群）、堆積岩類が占める横山ダム、宮川ダム、蓮ダムの各流域（第3群）と区分している⁴⁾。

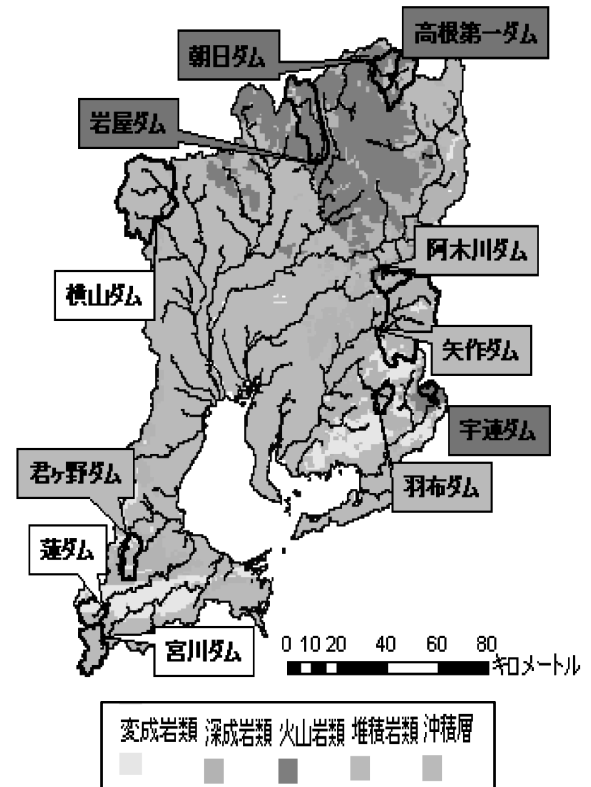


図-1 対象流域およびダムの位置と表層地質

(2) 土砂流出量の評価

ダム集水域からの土砂流出量を評価するため、各ダムの貯水池における堆砂量の経年変化を用いた。Brune⁵⁾は、貯水池内の滞留時間を示す変数（貯水量 / 流入量）と土砂補足率を経験的に関係付けており、国内外でその適用性が確認されている⁶⁾。しかしながら、本研究の対象ダムについては、年堆砂量が負の数値を示す場合もあるた

め、捕捉率を考慮して土砂流出量（生産量）を推定可能なのは正の堆砂量に限られることから、流出量を過大評価する危険性が高い。そこで本研究では、マイナスデータを有する対象ダムの年堆砂量データについて、負の堆砂量データを計測誤差と仮定して生起確率を考慮して補正手法（(社)日本大ダム会議土砂管理分科会⁷⁾）を適用し

表-1 対象流域を集水域とするダムの概要

（国土交通省ダム諸量データベース、電力土木技術協会水力発電所データベースより作成）

	水系	ダム	竣工年	総貯水量 (千m ³)	集水域面積 (km ²)	用途	上流のダム	上流ダムの竣工年	上流ダムの総貯水量(千m ³)
上流にダムがある	木曾川	朝日ダム	1953	25,513	225.0	発電	高根第二ダム	1969	11,927
		阿木川ダム	1991	48,000	81.8	河川維持、上水道、工業用水、発電	岩村ダム	1997	180
		岩屋ダム	1977	173,500	264.9	洪水調節、上水道、工業用水、発電	西村ダム	1938	276
	揖斐川	横山ダム	1964	43000※	471.0	洪水調節、灌漑※、発電	徳山ダム	2008	660,000
							神岳ダム	1935	215
	宮川	宮川ダム	1957	70,500	125.6	洪水調節、河川維持、発電	不動谷ダム	1961	71
上流にダムがない	木曾川	高根第一ダム	1969	43,600	125.0	発電			
	矢作川	矢作ダム	1971	80,000	504.5	洪水調節、農地防災、河川維持、灌漑、上水道、工業用水、発電			
		羽布ダム	1962	19,363	51.4	灌漑用水			
	櫛田川	蓮ダム	1991	32,600	80.9	洪水調節、農地防災、河川維持、上水道、発電			
	雲出川	君ヶ野ダム	1971	23,300	80.0	洪水調節、農地防災、河川維持、上水道、工業用水			
	豊川	宇連ダム	1958	28,420	26.3	灌漑、上水道、工業用水			

ただし、横山ダムの は2008年3月30日までの情報を示す。

た．これにより，累積堆砂量が保持されながら各年の堆砂量を正の数値に変換できることから，変換後の年堆砂量を年土砂流出量とするものとした．すなわち，土砂捕捉率は一律100%としたことになる．なお，ここで堆砂量の元データは各ダム管理所から提供を受けた（表-2参照）．

また，平均年土砂流出量 $Q_{s-ann} [m^3/year]$ の算定に当たっては，年土砂流出量の経年変化を累積表示した後，その傾きを採用した．この際，同時に得られる縦軸の切片については，初期土砂流出量 $Q_{s-init} [m^3]$ として別途，評価するものとした．これらに加えて，ダム建設からの経過年数 n を考慮することにより，累積土砂流出量（堆砂量） $Q_{s-cum} [m^3]$ は次式により算定されることになる．

$$Q_{s-cum} = Q_{s-ann} \cdot n + Q_{s-init} \quad (1)$$

(3) 土砂流出要因の抽出

冒頭に述べたように，ダム上流域における土砂流出には，素因として地形・地質などの流域特性，誘因として上流域における流況変動に起因する河道における移動床現象が大きく寄与している．

流域の地形特性については，表-3に示す変量について検討を行った．すなわち，既に田代ら⁴⁾により定量化され，対象流域間で統計的に有意な差が検出された，円形度，伸長率，水流頻度，水流密度，起伏比，粗度数，（面積高度比曲線の）比積分値といった変数を対象とし，(2)で得られた平均年土砂流出量および初期土砂流出量との関係について，それぞれ単相関分析を行い，相関係数の高い変数のみを土砂流出に関する説明変数として抽出した．また，これらとは別に，既往の研究^{8), 9)}で土砂流出との強い関係性が指摘されている起伏量，流水によらない地表変動現象を示す地すべり地形面積についても説明変数として採用した．なお，ここで地すべり地形面積は，(独)防災科学技術研究所¹⁰⁾よりデータを入手し，各対象流域における地すべり地形の総面積を求めて得た．ここでの地すべりは「岩，土あるいはその混合物の斜面降下運動の総称」¹¹⁾で，幅ないし奥行きが100m以上の規模の地表変動現象¹⁰⁾を示しており，英語表記のLandslideと同様，流動，落下などを含む広義の意味で使用している．図-2には，対象流域における地すべり地形面積をその占有率により示す．蓮ダム流域（第3群）で最も出現頻度が高く，次いで岩屋ダム流域（第2群），横山ダム流域（第3群），阿木川ダム流域（第1群）の順となっているが，地すべり地形と表層地質構成との対応関係は一意的には決まらず，流域特性を表す新たな指標として，地すべり地形面積の有効性を示唆するものと考えられる．

既往の研究において，ダム上流域の崩壊地を空中写真により判読して崩壊地面積や発生土量を算定し，貯水池堆砂量と関連付けた事例^{2), 9)}があるが，比較的大規模な崩壊地であれば，本データを活用することにより，空中

表-2 対象ダムにおける堆砂量，流入量の使用データ期間

対象ダム	竣工年	堆砂量データの検討対象期間	流入量データの取得・対象期間
朝日ダム	1953	1955～1968	1960, 1963～1968
阿木川ダム	1990	1991～2007	1991～2007
岩屋ダム	1976	1976～2006	1986～2007
横山ダム	1964	1964～2006	1974～2007
高根第一ダム	1969	1969～2007	1970, 1979～2007
矢作ダム	1970	1970～2006	1980～2007
羽布ダム	1962	1980～2007	1980～2007
宮川ダム	1956	1957～2008	1960, 1967～2008
蓮ダム	1991	1993～2006	1992～2007
君ヶ野ダム	1971	1972～2007	1972～2007
宇連ダム	1958	1969～2007	1969～2007

ただし，着色セルはデータに欠如があることを示す．

表-3 土砂流出に関わる流域地形量（鈴木⁸⁾を改変）

地形量	記号	定義	単位
谷口高度	H_{min}	流域の谷口（末端）の高度	m
最遠点高度	H_{dis}	谷口から分水界上の最遠点の高度	m
最高点高度	H_{max}	流域の最高点の高度	m
最大起伏	h_{max}	$H_{max} - H_{min}$	m
流域最大径	L_{max}	谷口から H_{dis} 地点までの距離	m
最高点距離	L_h	谷口から H_{max} 地点までの距離	m
流域縁辺長	P	流域分水界の長さ	m
流域面積	A	流域面積	m^2
水流次数	ω	Strahlerの次数	-
ω 次の水流本数	N_ω	流域内の ω 次の水流の本数	-
ω 次の水流長さ	L_ω	流域内の ω 次の水流の総長	m
円形度	R_c	$4\pi A / P^2$	-
伸長率	E_b	$2A^{0.5} / \pi / L_{max}$	-
水流頻度	F_s	N_ω / A (Schumm, 1956)	m^{-2}
水流密度	D_d	L_ω / A (Schumm, 1956)	m^{-1}
起伏比	R_h	h_{max} / L_h (Schumm, 1956)	-
粗度数	N_r	h_{max} / D_d (Strahler, 1958)	m^2
比積分値	S_v	面積高度比曲線の比積分値	-
相対起伏	R_{hp}	h_{max} / P (Melton, 1957)	-
起伏量	h	流域内の1kmメッシュ*における標高差の平均値（竹林ら，1992）	m
地すべり地形面積	A_L	流域内の地すべり地形**の総面積	m^2

ただし，斜体の地形量は基本地形量で直接の検討対象ではない．

*出典：国土数値情報 標高・傾斜度3次メッシュデータ¹²⁾

**出典：地すべり地形分布図データベース¹⁰⁾

写真判読に関する専門技量を必要とせずと同様の考察が可能な点は特筆に値しよう．なお，ここでの地形特性量の解析には，Arc View 9.2および10.0 (ESRI Japan) による地理情報システムを用いた．

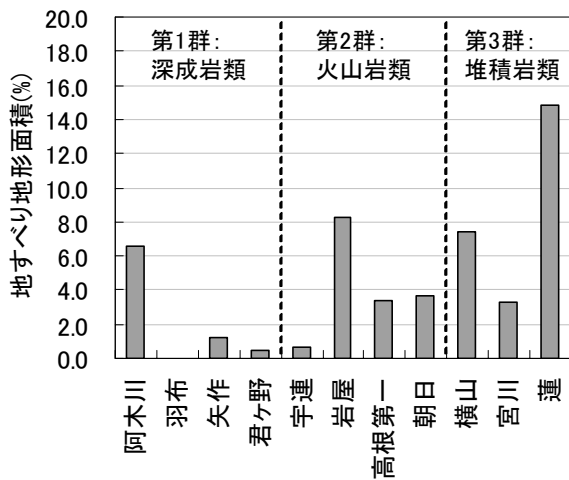


図-2 対象流域(ダム名表記)の地すべり地形面積占有率

ダム上流域における流況変動については、貯水池への日平均流入量データを各ダム管理所から提供を受けて用いた(表-2参照)。また、河道における移動床現象については、橋本・永野¹³⁾、田代ら⁴⁾に倣って流出土砂量を流砂量の年積算値と等価であると仮定し、土砂の流送形態を考慮して以下のような整理を行った。すなわち、掃流砂と浮遊砂の混合した全流砂量を考察対象とする条件下において、限界掃流力を考慮しないとすれば、単位幅、単位時間当たりの全流砂量 q_T は定数 K_T を用いて次式で得られる¹⁴⁾。

$$\frac{q_T}{\sqrt{sgd^3}} \cong K_T \left(\frac{u_*^2}{sgd} \right)^{5/2} \quad (2)$$

ここで、 s : 粒子水中比重、 g : 重力加速度、 d : 材料の粒径、 u_* : 摩擦速度である。次に、全幅流量(流入量)を Q 、全幅流砂量を Q_s 、流速を U 、水深を h 、エネルギー勾配(河床勾配)を I_e とすると、流速係数 $\phi = U/u_*$ 、摩擦速度 $u_* = \sqrt{ghI_e}$ より、次式が導かれる⁴⁾。

$$Q_s = \frac{K_T}{s^2 \phi^3} \cdot \frac{I_e^{5/3}}{d} \cdot Q^3 \quad (3)$$

さらに $K' = K_T/g^{1/3}$ とし、この両辺を t で積分すると次式が導かれる⁴⁾。

$$\int_0^{1\text{year}} Q_s dt \cong \frac{K'}{s^2 \phi^3} \cdot \frac{I_e^{5/3}}{d} \int_0^{1\text{year}} Q^3 dt \quad (4)$$

この式の左辺(の年平均値)が、式(1)の平均年土砂流出量 Q_{s-ann} [$m^3/year$]と等価なことは自明である一方、右辺においては定数 K' 、流速係数 ϕ 、材料粒径 d については実データが得られていない。そのため、ここでは、定量可能なエネルギー勾配(ダム上流域の相対起伏で代替可能

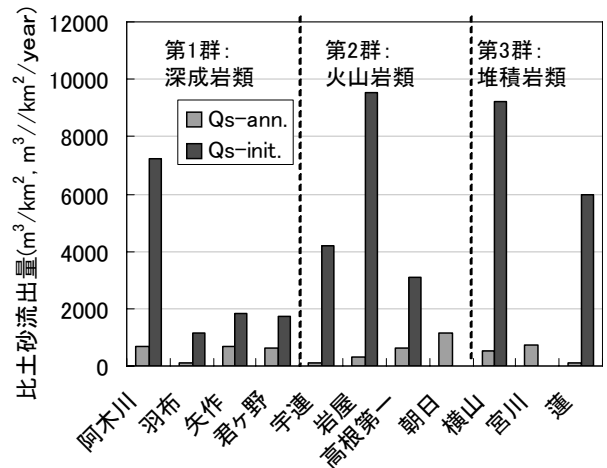


図-3 対象流域(ダム名表記)における比土砂流出量 (Q_{s-ann} : 年平均値 [$m^3/km^2/year$], Q_{s-init} : 初期値 [m^3/km^2])

と仮定⁴⁾)と河道全幅流量(貯水池への流入量と等価)を、式(4)と等しい形を保持し、説明変数として採用した。

3. 結果と考察

対象ダムにおける年堆砂量の経年変化を精査したところ、朝日ダム、宮川ダムを除く9基のダムにおいて、負の堆砂量データが確認されたため、(社)日本大ダム会議土砂管理分科会⁷⁾の手法にしたがい、データの補正を行った。補正により得た年土砂流出量の経年変化から、平均年土砂流出量 Q_{s-ann} と初期土砂流出量 Q_{s-init} を求めた。

図-3には、比土砂流出量としてその結果を示す。図より、ダム建設当初の初期比土砂流出は、マイナスデータが存在しなかったために、年堆砂量を補正しなかった朝日ダム、宮川ダムを除き、多くのダム流域において顕著に大きくなった。平均年土砂流出量においては、朝日ダム流域で最大値を呈し、同じ集水域を抱える高根第一ダムと比べても顕著に大きかった。これは朝日ダム建設後、その上流に高根第一ダムが建設されたため、堆砂量データの検討対象期間が、他のダムのそれに比べて、1955~1968年と古いこと(表-2参照)による影響と推察される。直接的な要因については、当該年代の流域の土地被覆状態が他の年代と異なっていたものと類推されるが精査が必要であろう。その他のダム流域の比土砂流出量について、芦田・奥村²⁾の整理を参照すれば、羽布ダム、宇連ダム、蓮ダムの各流域を除き、全国的には中程度の土砂流出量を示す流域に相当することが確認された。また、土砂流出量の年平均値と初期値の対比によれば、横山ダム流域の初期流出量が約51.4年分の年流出量に相当して最大であったのに対し、矢作ダム流域では約2.6年分、君ヶ野ダム流域では約2.7年分に過ぎなかった(図-3参照)。この違いを生み出す要因については後述したい。

表-4 土砂流出量（年平均値，初期値）と各種流域特性量の単相関解析（表中の数値は相関係数）

	流域縁辺長	流域面積	円形度	伸長率	水流頻度	水流密度	起伏比	粗度数	比積分値	起伏量	地すべり面積	エネルギー勾配	年総流入量
	P	A	R_c	E_b	F_s	D_d	R_h	N_r	S_v	h	A_L	I_e	Q
平均年土砂流出量 $Q_{s-ann.}$	0.848	0.895	0.068	0.273	-0.506	-0.168	-0.114	0.640	-0.217	0.053	0.366	-0.238	0.839
初期土砂流出量 $Q_{s-init.}$	0.682	0.676	-0.189	0.060	-0.154	0.050	-0.412	-0.080	0.153	0.154	0.927	-0.515	-0.412

ただし，図中太字は良好な相関が得られたことを示し，下線は土砂流出量推定のために採用した説明変数を表す．

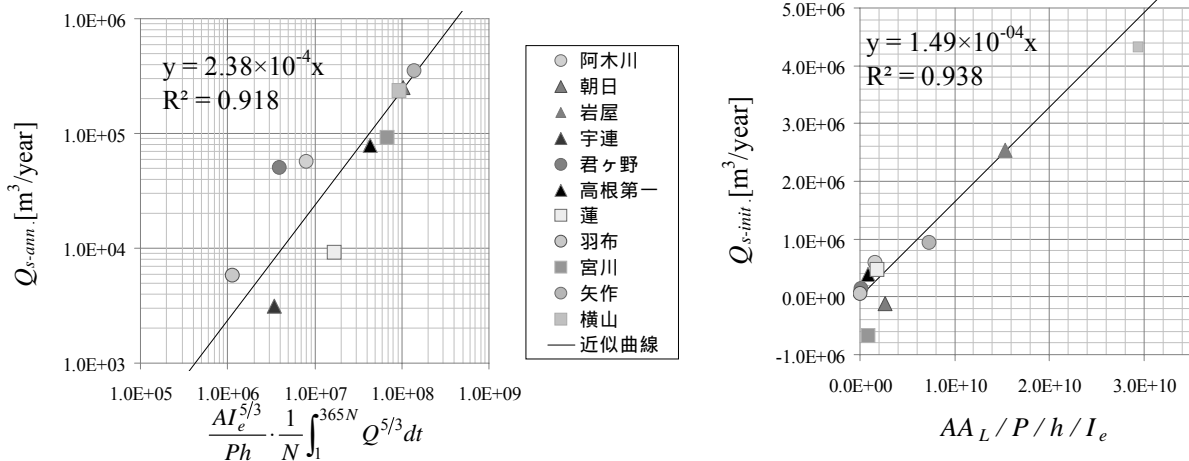


図-4 平均年土砂流出量（左）および初期土砂流出量（右）の推定（近似曲線，関数および相関係数を付記）

なお，図には主要な表層地質区分も併記したが，比土砂流出量の相対的な大小関係は，表層地質とは直接関係しないものと判断された．

流域の地形特性のうち，土砂流出に関わる影響要因を抽出するため，平均年土砂流出量および初期土砂流出量を目的変数とする単相関解析を行った．表-4には，各種流域特性量と土砂流出量との相関係数を示す．平均年土砂流出量は，流域潤辺長，流域面積，平均年総流入量と良好な相関性が確認された一方，初期土砂流出量は，地すべり地形面積と良好な相関性が，流域潤辺長，流域面積とやや良好な相関性が確認された．流域面積やこれとの良好に相関する流域潤辺長が，土砂流出量に影響を及ぼしている関係は，芦田・奥村²⁾を始めとする既往の知見と一致したが，本研究で新たに導入した地すべり地形面積が，初期土砂流出量に対して強い説明力を有する可能性が示されたことは興味深い．なお，表中には，後述する土砂流出量推定式に用いる説明変数を併せて下線で示した．この選択に際しては，相関係数0.65を閾値としてこれを上回る変数を採用したうえで，前述した通り，既往研究^{8), 9)}により有効性が確認済みの起伏量と，河道での流砂発生を支配するエネルギー勾配について，別途，変数に加えた．

平均年土砂流出量 $Q_{s-ann.}$ については，式(4)に示した全流砂量式の書式に準じて複合変数を作成し，単相関解析を行ったところ，図-4の左図の関係（相関係数0.918）が得られた．これを定式化すると次式で表される．

$$Q_{s-ann.} = \alpha \frac{AI_e^{5/3}}{Ph} \cdot \frac{1}{N} \int_1^{365N} Q^{5/3} dt \quad (5)$$

ここで， α ：単位補正係数（ $=2.38 \times 10^{-4} [m^2]$ ，図-4参照）， N ：各ダムにおける流入量の対象期間年数（表-2参照）であり， t は日単位である．この式には，結果的に右辺に流域面積が含まれているため，平均年比土砂流出量（ $Q_{s-ann.} / A$ ）の推定にも適用できる．式(5)中のエネルギー勾配が相対起伏で仮評価されていることを踏まえれば，次式のようにも解釈できる．

$$Q_{s-ann.} / A = \alpha \frac{h_{max}^{5/3}}{P^{8/3} h} \cdot \frac{1}{N} \int_1^{365N} Q^{5/3} dt \quad (6)$$

式(6)では，分子に最大起伏の5/3乗，分母に流域潤辺長の8/3乗，起伏量が位置づけられており，流域サイズが小さく，流域内の比高は大きい局所的な起伏は小さいほど，比流出土砂量が大きくなる関係が見出された．流域の起伏形態は流出土砂を制約し，起伏比（最大起伏 / 最高点距離，表-3参照）と比流出土砂量の間には，正の相関性が成立するとされており⁸⁾，式(6)による比流出土砂量の定式化は，こうした既往の知見を支持するものとなっている．

初期土砂流出量についても，同様に複合変数を作成し，単相関解析を行ったところ，図-4の右図に示す関係（相関係数0.938）が得られた．なお，本図の関係を定式化すると次式で表される．

$$Q_{s-init.} = \beta \frac{AA_L}{PhI_e} \quad (7)$$

$$Q_{s-init.} / A = \beta \frac{A_L}{hh_{max}} \quad (8)$$

ここで、 β : 単位補正係数 ($=1.49 \times 10^{-4} [m]$, 図-4参照) である。式(8)では、分子に地すべり地形面積、分母に最大起伏と起伏量が位置づけられた。したがって、地すべり発生頻度(面積)が大きく、流域内の比高、局所的な起伏ともに小さいほど、初期比土砂流出量が大きくなる傾向が見出された。一般に、急峻な流域は地形浸食が進んで河谷が発達した結果であるため、土砂流出は少なくなるとされ⁸⁾、ダムが建設されて貯水池が出現すると、その末端域には浸食余地の大きな新しい河谷が出現することになる。上式において、比高・起伏ともに小さいほど初期土砂流出が増えるという関係は、一見、自然の摂理に反するように思われるが、山間地であって尚比高が小さい流域においては、貯水池の形成により未発達な新しい河谷が広範囲に出現することから、初期土砂流出が大きくなったものと推察される。また、こうした山間地の緩やかな土地は、地すべりに伴う地形変化によって生じた可能性も示唆されよう。

上記2種の土砂流出要因の考察により、局所的な起伏の小ささは共に土砂流出量に正に寄与するが、流域内の比高はその年平均値に正に寄与する一方、その初期値には負に寄与するといった関係が得られた。蛇足ながら、これら2種の土砂流出量に関する推定式(式(5), (7))を式(1)に代入すれば、累積堆砂量に関する良好な推定式が得られることも付記しておく。

4. おわりに

本研究では、山地流域における流出土砂量を対象とし、ダム貯水池における年堆砂量、上流域における流況変動と地すべり地形を含む流域特性の相互関係について、単相関解析を用いて考察を行った。さらに、ここでの結果を踏まえ、ダム流域の流出土砂量について、平均年土砂流出量と初期土砂流出量に分離して評価することにより、従来よりも高精度な土砂流出量の推定式を構築した。この際、流域サイズ、流域内比高、局所起伏、地すべり面積、貯水池への年総流入量が支配要因として抽出することに成功した。これらの結果から、対象流域の流末における河川流況、地すべり地形面積は土砂流出量を評価する重要な要因のひとつであることが確認されたと思われる。今後は、土砂の生産プロセス^{15), 16)}についても検討を進め、複雑かつ難解な土砂流出過程の解明につながる知見を積み重ねていきたい。

謝辞: 本研究の実施に際し、表層地質データは(独)産業技術総合研究所地質調査総合センターに、地すべり地形分布図データは(独)防災科学技術研究所に、各ダムの堆砂量および流入量は、国土交通省中部地方整備局を始め、愛知県、三重県、(独)水資源機構中部支社、中部電力株式会社に提供いただいた。ここに関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 竹林征三, 廣瀬昌由, 尾作悦男: ダム貯水池堆砂量の推定法についての試論 確率過程として堆砂現象をとらえる, ダム工学, No.8, pp.6-20, 1992.
- 2) 芦田和男, 奥村武信: ダム堆砂に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第17号B, pp.555-570, 1974.
- 3) ダム技術センター編: 多目的ダムの建設, 平成17年版, 第3巻調査II編, ダム技術センター, 2005.
- 4) 田代 喬, 栃木宏之, 高岡広樹, 辻本哲郎: 集水域特性からみたダム上流域における土砂生産の評価, 河川技術論文集, Vol. 15, pp.71-76, 2010.
- 5) Brune, G.M: Trap efficiency of reservoirs, Trans. AGU, Vol.34, No.3, pp.407-418, 1953.
- 6) 例えば, 江崎一博: 貯水池の堆砂に関する研究, 土木研究所報告, 第129号, pp.1-29, 1966.
- 7) (社)日本大ダム会議土砂管理分科会: 土砂管理分科会報告書 貯水池の土砂動態と土砂制御工法, 大ダム, No.212, pp.10-129, 2010.
- 8) 鈴木隆介: 建設技術者のための地研図読図入門, 第3巻段丘・丘陵・山地, 古今書院, 東京, pp.556-942, 2000.
- 9) 井上大榮, 角田隆彦, 河村和夫, 友利方彦: わが国における地質別の崩壊特性と貯水池堆砂(その1) 地質から見た崩壊特性, 応用地質, Vol.33, No.3, pp.1-10, 1992.
- 10) (独)防災科学技術研究所: 地すべり地研データ「伊勢」, 「名古屋」, 「豊橋」, 「岐阜」, 「飯田」および「高山」: 防災科学技術研究所地すべり地形分布図データベース, <http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/gis-data/index.html>.
- 11) 地すべりに関する地研地質用語委員会: 地すべり 地研地質的認識と用語, (社)日本地すべり学会, 318p, 2004.
- 12) 国土交通省国土政策局国土情報課: 国土数値情報 標高・傾斜度 3 次 メ ッ シ ュ デ ー タ, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgeis/datalist/KsjTmplt-G04-a.html>.
- 13) 橋本晴行, 永野博之: 九州におけるダム堆砂の実態と土砂流出特性, 第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.167-171, 2008.
- 14) 辻本哲郎, 中川博次: 掃流から浮遊への遷移機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.369/II-5, pp.43-50, 1986.
- 15) 村上泰啓, 山下章司: 山地流域における地質成因に着目した土砂生産と河道堆積土砂の移動実態について, 水工学論文集, Vol.51, pp.959-964, 2007.
- 16) 堤 大三, 藤田正治, 泉山寛明: 気温上昇による土砂生産に対する凍結融解の影響変化予測, 水工学論文集, Vol.53, pp.649-654, 2009.

(2012.4.5受付)