

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

EVALUATION OF SEDIMENT YIELD FROM UPPER WATERSHED OF DAM
BASED ON FLOW AND LANDSCAPE CHARACTERISTICS

田代 喬¹・栃木宏之²・高岡広樹³・辻本哲郎⁴

Takashi TASHIRO, Hiroyuki TOCHIGI, Hiroki TAKAOKA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院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1番地)

²非会員 福井県 三国土木事務所 (〒913-0043 福井県坂井市三国町錦4-2-68)

³正会員 博(工) 名古屋大学研究員 大学院工学研究科社会基盤工学専攻

⁴フェロー 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻

Sediment yield from upper watershed of dam is dependent on the watershed landscapes such as surficial geology, land cover and geography. According to principal component analyses with the landscape variables (through Geographical Information System) at 11 dam watersheds located in the Ise Bay basin, central area of Japan, they were categorized to three groups significantly characterized by their lithologic composition. Furthermore, by using annual inflow discharges and annual rate of sediment deposition into the reservoirs, evaluations of sediment yields from the upper watersheds of dams were presented for the each group and were approximately supported with some bed material load formulae developed in the conventional hydraulic studies.

Key Words : *Sediment yield, watershed landscape, lithologic composition, principal component analysis, sediment deposition into reservoirs, bed-material load formulae*

1. はじめに

流域における土砂動態は、山地域での地形変化を伴う生産、河川などの水路を通じた運搬によって駆動されているシステムである。かつて大量の土砂を配分してきたが、ダム建設等による土砂のかん止や砂利採取により下流への土砂供給が不足し、河床低下や海岸侵食などの問題が顕在化してきた。このような流砂系の修復が求められている中、治山・砂防・河川・海岸事業を通じて総合的な土砂管理の重要性が認識されつつある¹⁾。中でも土砂生産は流砂系の原点に相当することから、その生産量の把握は重要視されており、流域の規模、地形・地質、地被条件、水文・気象条件、河道の水理特性、さらには人為的諸作用が支配要因とされている^{2,3)}。

土砂生産量に対する具体的アプローチとしては、斜面崩壊箇所のモニタリングを行って発生量を直接的に計測するほか⁴⁾、ダム貯水池における堆砂量の経年変化に着

目する場合がある⁵⁾⁻⁷⁾。いずれも表層地質構成によって土砂生産特性が異なる結果を呈しているが⁴⁾⁻⁷⁾、主な対象は大規模な集水域を持つ多目的ダムであることから、表層地質、土地被覆が複合的に構成されるため、土砂生産の影響要因を特定できるとは言い難い。ただし、井上ら⁵⁾が崩壊地から発生する土砂量と貯水池堆砂量の間には比較的良い相関が得られたと報告しているように、貯水池における堆砂データは貯水機能を精査する材料としてだけでなく、土砂生産を評価する材料としても重要な情報である。

以上に鑑み、本研究ではダム集水域における土砂生産に関わる複合的な影響要因を整理するため、表層地質、土地被覆、地形特性といった景観の特徴(地理的特性)を分析する。さらに、その結果を踏まえた集水域の類型化に基づき、橋本・永野⁸⁾の整理に倣って、貯水池の堆砂量データ、流入量データを既往の流砂量式により物理的に関連付けることによって、貯水池への土砂流入量の評価を試みる。

2. 材料と方法

(1) 対象流域

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。また、ダム竣工後には貯水池周辺の人為的な環境変化により堆砂量が増加することを勘案⁹⁾、ダム堤体竣工後10年以上経過した後のデータを採用した。対象流域として選定された集水域を有する各ダムの位置図を図-1に、各ダムの概要を表-1に示す。

(2) 対象流域の景観的分類

ダム集水域の分類に当たっては、流域の表層地質、土地被覆、地形特性といった各景観項目の特徴を分析したうえで、これらを総合的に考慮した分類を試みた。すなわち、以下で各項目ごとに定義する変数を用いた主成分分析を行い、この結果として得られた第2主成分までの主成分得点（3項目×2成分=6変数）により、クラスター分析（ウォード法、ユークリッド距離）を行った。なお、各変数の抽出は、Arc View 9.3 (ESRI Japan) を用いたGIS (Geographic Information System) によった。

(a) 流域の表層地質

表層地質図（産業技術総合研究所地質調査総合センター提供）における地質区分を参照し、岩石の生成要因を考慮して堆積岩類、変成岩類、深成岩類、火山岩類に再分類し、砂や礫のように固結していない地域は沖積層

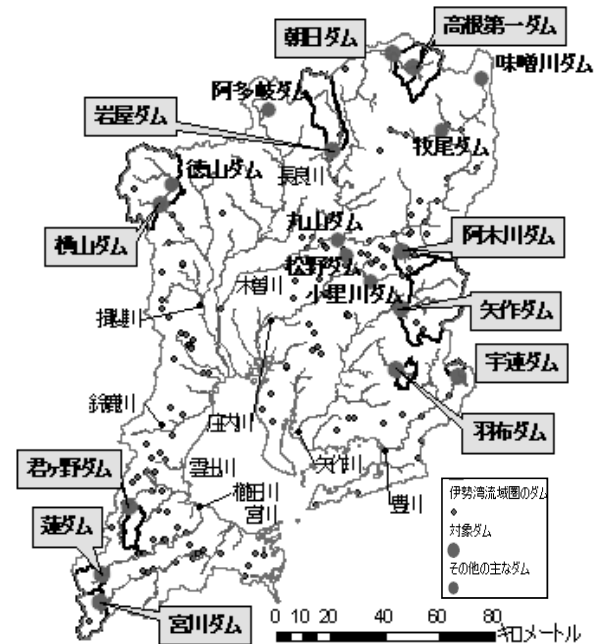


図-1 対象流域およびそれを集水域とするダムの位置図

とすることにより、対象流域における表層地質5区分の構成比率を算定した。ここでの各地質区分における構成比率を解析に用いる変数とした。

(b) 流域の土地被覆

最新（平成18年）の土地利用種別100mメッシュ（国土交通省国土数値情報）にしたがい、対象流域における以下の各被覆区分における構成比率を解析に用いる変数とした。

- ・ 森林：多年生植物の密生している地域。
- ・ 荒地：しの地（竹・笹の密生地）、荒地（雑草地、裸地）、崖（土砂崩壊などでできた急斜面、人工的

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	木曽川	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	木曽川	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			
	榑田川	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。

表-2 基本地形量とその定義（引用は鈴木¹⁰）

基本地形量	記号	定義
谷口高度	H_{min}	流域の谷口の高度
最遠点高度	H_{dis}	谷口から分水界上の最遠点高度
最高点高度	H_{max}	流域内の最高点高度
最大起伏	h_{max}	$H_{max} - H_{min}$
流域起伏	h_b	$H_{dis} - H_{min}$
流域最大径	L_{max}	谷口から H_{dis} 地点までの距離
最高点距離	L_h	谷口から H_{max} 地点までの距離
流域縁辺長	P_b	主分水界の長さ
流域面積	A_b	流域面積
水流(谷)の次数	ω	Strahler の流路次数
ω 次の水流本数	N_ω	ω 次の水流の本数
ω 次の水流長さ	L_ω	ω 次の水流の長さ

表-3 誘導地形量とその定義（引用は鈴木¹⁰）

	地形量	記号	定義	定義者
(a)平面形状	円形度	R_c	$4\pi A_b / P_b^2$	Miller(1953)
	伸長率	E_b	$2A_b^{0.5} / \pi / L_{max}$	Schumm(1956)
(b)谷密度	1次水流頻度	F_1	N_1 / A_b	Schumm(1956)
	水流頻度	F_s	$\sum N_\omega / A_b$	
	水流密度	D_d	$\sum L_\omega / A_b$	
(c)起伏状態	起伏比	R_h	h_{max} / L_h	Schumm(1956)
	相対起伏	R_{hp}	h_{max} / P_b	Melton(1957)
	粗度数	N_r	h_{max} / D_d	Strahler(1958)
	流域傾斜	θ_b	h_b / L_h	
	(d)高度分布	面積高度比曲線の比積分値	S_v	別途本文中で解説

に作られた急斜面を含む), 湿地, 採鉱地等.

- ・ 田: 湿田, 乾田, 沼田, 蓮田及び田.
- ・ その他の農用地; 畑地, 果樹園とし, 牧草を栽培する草地, 芝地を含む.
- ・ 河川地及び湖沼: 人口湖・自然湖・池・養魚場等で平水時に常に水を湛えているところ及び河川・河川区域の河川敷.
- ・ その他の用地: 幹線交通用地, 建物用地, 運動競技場, 学校地区など.

(c) 流域の地形特性

鈴木¹⁰, 田代ら¹¹に倣い, 数値地図50mメッシュ(標高)(国土地理院発行)を用いて, 種々の基本地形量(表-2参照)とその組み合わせによる誘導地形量(表-3参照)を算定した. 流域の平面形状は河系模様などと共にハイドログラフを制約する一方, 起伏状態は流域の水や土砂の流出の制限要因になることが知られている¹⁰. また, 面積高度比曲線はそれぞれ0~1で基準化した比面積と比高の関係を示し, この曲線を積分した比積分値 S_v は, 流域全体の侵食・堆積傾向を示す指標であるとされている¹⁰. ここでは10種の誘導地形量の相関係数が0.50より大きい因子のいずれかを排除することで共線性を排除し, 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(以下, 比積分値と表記)の7変数を選択して解析に用いた.

(3) 流入土砂量の評価

はじめに, ダム集水域における生産土砂を評価するため, 各ダムの貯水池における堆砂量の経年変化から各年の流入土砂量を推定した. Brune¹²は, 貯水量/流入量といった貯水池内の滞留時間を示す変数と貯水池の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¹³. ここでは江崎¹³の指摘を参考に, 日本国内事例への適合性が高い土砂補足率の上限値を表す曲線を用いて, 堆砂量から土砂流入量を推定した. この際, 貯水量は表-1中の総貯水量を, 流入量, 堆砂量は

各ダムにおける各年の積算値(各ダム管理所提供, 流入量の一部はダム諸量データベースより入手)を用いた.

次に, ここで推定した流入土砂量について, 流砂量式の適用性を考察するため, 橋本・永野⁸⁾に倣って流入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, 掃流砂の場合, スイス公式型で限界掃流力を考慮しないとき, 単位幅, 単位時間当たりの掃流砂量 q_B は次式のように表される.

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} \cong K_B \left(\frac{u_*^2}{sgd} \right)^{3/2} \quad (1)$$

ここで, s : 粒子水中比重, g : 重力加速度, d : 材料の粒径, K_B : 定数, u_* : 摩擦速度である. 次に, 全幅流量(流入量)を Q , 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.

$$Q_s = Q K_B I_e / (s\phi) \quad (2)$$

さらに両辺を t で積分すると, 以下の関係が得られる⁸⁾.

$$\int_0^{1\text{year}} Q_s dt = \int_0^{1\text{year}} Q \frac{K_B}{s\phi} I_e dt \cong \frac{K_B}{s\phi} I_e \int_0^{1\text{year}} Q dt \quad (3)$$

[単位: $m^3/year$]

一方, 浮遊砂も含めた全流砂型で流送され, 式(1)と同様に限界掃流力を考慮しないとき, 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⁾.

$$\frac{q_T}{\sqrt{sgd^3}} \cong K_T \left(\frac{u_*^2}{sgd} \right)^{5/2} \quad (4)$$

これを式(2)と同様に展開すれば次式が得られる.

$$Q_s = \frac{K_T}{s^2 g^{1/3} \phi^{5/3}} \cdot \frac{I_e^{5/3}}{d} \cdot Q^{5/3} \quad (5)$$

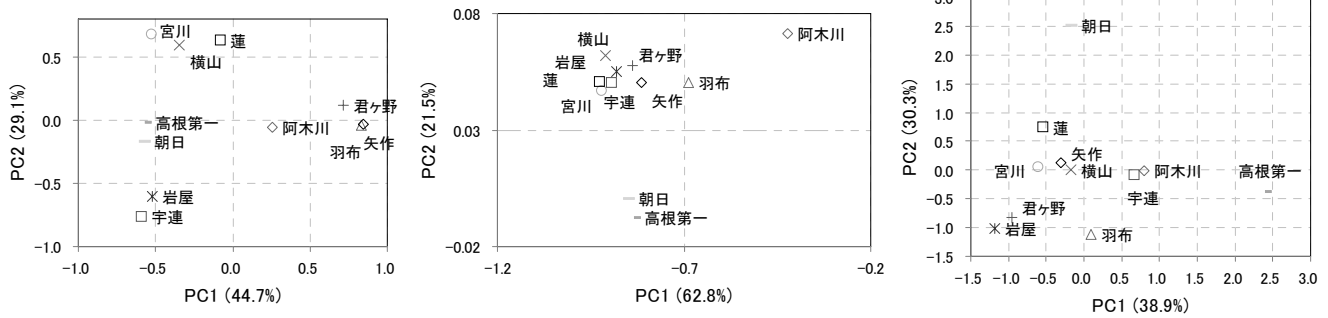


図-2 集水域特性の主成分分析：第1，第2主成分で展開されたダム集水域の散布図（左：表層地質，中：土地被覆，右：地形特性）

表-4 集水域特性の主成分分析：使用変数と各主成分の因子負荷量および寄与率（左：表層地質，中：土地被覆，右：地形特性）

	PC1	PC2		PC1	PC2		PC1	PC2
沖積層	0.76	-0.24	森林	-0.95	0.05	円形度	0.02	0.79
堆積岩類	-0.55	0.71	荒地	-0.21	-0.77	伸長率	0.55	0.21
変成岩類	0.39	0.55	田	0.96	0.16	水流頻度	0.77	-0.38
深成岩類	0.93	-0.10	その他の農用地	0.99	0.04	水流密度	0.73	-0.43
火山岩類	-0.59	-0.76	河川地及び湖沼	-0.15	0.79	起伏比	0.77	0.48
寄与率(%)	44.7	29.1	その他の用地	0.95	-0.2	粗度数	-0.82	-0.29
			寄与率(%)	62.8	21.5	比積分値	-0.16	0.90
						寄与率(%)	38.9	30.3

（ただし，太字で記した因子負荷量は $P > 0.05$ で有意）

さらに $K' = K_T / g^{1/3}$ とし，両辺を t で積分すると次式が導かれる．

$$\int_0^{1\text{year}} Q_s dt \cong \frac{K'}{s^2 \phi^3 d} I_e^3 \int_0^{1\text{year}} Q^3 dt \text{ [単位: m}^3/\text{year}] \quad (6)$$

ここでの整理，特に式(3)，(6)の対比においては，河道の流量，勾配が流砂量を支配している点が両式に共通している．そこで次章の結果の解析においては，流量，勾配の積として表現可能なStream Power¹⁵⁾を説明変数として，両式の適用性から考察を行うものとした．Stream Power（定義式 $\tau_0 U$ ， τ_0 ：底面せん断応力）は次式で示されるように，流砂量と良好な相関が得られている¹⁵⁾．

$$q_B \propto \tau_0 U = \rho g I_e U h = \rho g q I_e \quad (7)$$

ここで， ρ ：水の比重， q ：単位幅流量である．ただし，式(6)の全流砂量式には，材料粒径に関する項が含まれている．河床材料が表層地質によって異なること¹¹⁾を踏まえれば，本検討における簡素化した流砂モデルにおいても，集水域特性が直接的に流砂量，土砂生産を左右する余地が残されていると考えられ，注目に値する．

3．結果と考察

(1) 対象流域の景観的分類

表層地質，土地被覆，地形特性といった各景観項目についてそれぞれ主成分分析を行った結果，得られた第1，第2主成分得点で展開された散布図を図-2に，使用した全変数と各主成分の因子負荷量と寄与率を表-4に示す．

表層地質について，第1主成分には深成岩類の構成比率が，第2主成分には堆積岩類の構成比率が寄与した．そのため，65%以上を深成岩類が占める君ヶ野ダムと矢

作ダム，羽布ダムの集水域が近い関係にあった．また，堆積岩が50%以上を占める宮川ダム，横山ダム，蓮ダムの集水域も地質構成では類似していた．火山岩類の構成比率が50%程度以上を占めるその他の4ダムも近い位置にあり，地質構成の分析からは対象ダム11基の集水域はおおよそ3グループに分類できるものと考えられる．

土地被覆では，第1主成分は田，その他の農用地，その他の用地の因子負荷量がいずれも0.9を超え，人間活動の影響度合いを示す合成変数となった．特に，阿木川ダム集水域ではこれらの占有率が25%以上，羽布ダム集水域でも10%以上となっており，他の対象ダムとは土地利用の点で異なった特性を持つことが示された．第2主成分では河川地及び湖沼の因子負荷量が他の土地利用種別カテゴリーよりも超越して大きくなっているほか，荒地の因子負荷量がマイナス方向への寄与を示した．その結果，荒地占有率が7%以上と他の対象ダムよりも卓越する朝日ダム，高根第一ダム集水域の土地被覆条件はやや特殊であることが確認された．ただし，第2主成分の変異は他の主成分のそれに比べ極めて小さく，総じて似通った状況にあると推察される．

地形特性について，第1主成分では水流頻度，水流密度，起伏比，粗度数，第2主成分では円形度と比積分値の寄与が大きかった．他の景観項目ほどに顕著な傾向が見られなかったが，表層地質でも類似した関係にあった蓮・宮川・横山ダムは近い位置にプロットされており，この3基のダム集水域の地形特性は表層地質による影響が色濃く反映されたものと思われた．

以上を踏まえ，各景観項目の主成分分析より得られた第2主成分までのスコアを用いてダム集水域を対象ケースとするクラスター分析を行ったところ，図-3に示すデンドログラムが得られた．図より，本検討における対象集水域は次に示す3つのカテゴリーに分類され，第1群に

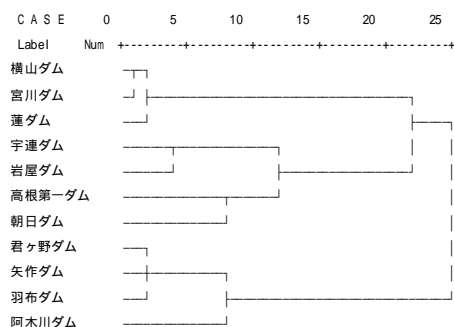


図-3 主成分スコア(6変数)を用いたクラスター分析による対象ダム集水域のデンドログラム

表-5 クラスター分析により分類された集水域群の景観的特徴

	変数	第1群	第2群	第3群
表層地質	火山岩類(%)	5.3±10.1	74.0±23.5	0.0±0.0
	深成岩類(%)	67.4±15.7	0.9±1.8	4.7±8.1
	変成岩類(%)	12.6±11.6	0.3±0.6	16.6±28.8
	堆積岩類(%)	7.0±10.9	24.8±24.5	77.3±24.0
	沖積層(%)	7.7±7.8	0	0
土地被覆	森林(%)	84.7±10.3	91.1±2.6	95.9±0.4
	荒地(%)	0.9±0.9	4.5±3.2	1.6±0.7
	田(%)	7.9±6.7	0.4±0.4	0.1±0.2
	その他の農用地(%)	2.3±2.0	0.5±0.4	0.0±0.0
	河川地及び湖沼(%)	1.7±0.6	2.5±1.8	2.2±0.4
	その他の用地(%)	2.5±1.3	1.1±0.8	0.1±0.2
地形特性	円形度	0.38±0.04	0.39±0.06	0.43±0.08
	伸長率	0.49±0.09	0.47±0.10	0.51±0.06
	水流頻度	0.35±0.12	0.37±0.18	0.2±0.01
	水流密度	0.56±0.03	0.60±0.32	0.52±0.04
	起伏比	0.08±0.02	0.14±0.07	0.10±0.02
	粗度数	1.95±1.04	3.02±2.17	2.60±0.34
	比積分値	0.40±0.06	0.36±0.07	0.45±0.03

阿木川ダム, 羽布ダム, 矢作ダム, 君ヶ野ダム, 第2群に宇連ダム, 岩屋ダム, 高根第一ダム, 朝日ダム, 第3群に横山ダム, 宮川ダム, 蓮ダムが区分された。

各分類群の集水域特性に関する変数を表-5に示す。第1群は深成岩類, 第2群は火山岩類, 第3群は堆積岩類の構成比率が大きいのが特徴的で, 対象流域の分類においては, 結果的に表層地質の寄与するところが大きかった。

(2) 流入土砂量の評価

図-4には, 対象流域におけるダム貯水池への流入土砂量について, 竣工年からの経年変化を示す。図中の縦軸は, 規模の異なる流域の相对比较を行うために, 流入土砂量を集水域面積で除した。およそ, 宮崎ら¹⁶⁾の示した典型的な流入パターン(A: 一様に増加, B: 増加が減速, C: 増加が加速)に適合したが, 明確な傾向が無く, ほとんど堆砂が進行しないケースも存在した。施設維持・管理のための抜水(数年おきに朝日ダム, 高根第一ダムにて), 再開発のための浚渫(2000年以降, 横山ダムにて)のほか, 洪水時の濁水放流による浮遊砂の流出に起因する可能性が考えられるが, これらの実態が未把握であるため, 以下の検討では考慮しなかった。

流砂量式による流入土砂量の評価に当たっては, Stream Power(勾配×流量)に着目し, 掃流砂型(式

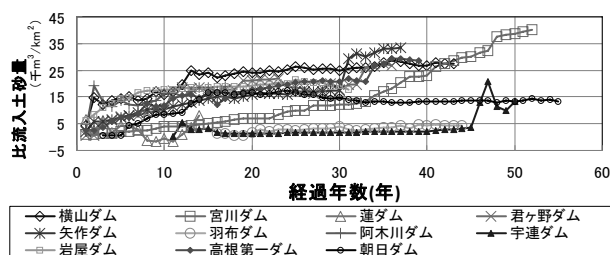


図-4 対象流域を有するダム貯水池への流入土砂量の経年変化

(3) が全流砂型(式(6))によって説明されると考え, 両対数グラフ上で傾き1の直線への適合度(R^2 値)を求めた。式(6)の適用に当たり, 流量 Q は各ダム貯水池における月平均流入量を用いた。図-5に掃流砂型, 図-6に全流砂型を想定した際の流入土砂量との関係を示す。掃流砂型の R^2 値は第1群で0.33, 第2群で0.041, 第3群で0.38となり, 全流砂型では第1群で0.15, 第2群で0.27, 第3群で0.26となった。第1群, 第3群では掃流砂型の適合度がより高く, 第2群では全流砂型における説明力がやや高かった。橋本・永野⁸⁾は, 九州地方のダム堆砂量を対象とした整理から, 地理的変異によらず流入量によって説明できる可能性を示唆したが, 伊勢湾流域の集水域は該当しなかった。

ところで, 全流砂型の式(6)右辺には粒径 d が含まれていることから, 集水域から流出する材料特性について図-6中の近似直線の y 切片を利用した議論が可能である。各群を比較するとそれぞれ0.10, 0.015, 0.051となり, 第2群の粒径が相対的に大きいことが示唆された。第1群のダム集水域は主に深成岩類(花崗岩など)で構成されるため, 風化したマサ土を大量に産出する³⁾。また, 第3群は堆積岩類からなる集水域であり, 深成岩類からなる集水域に比べ産出土砂の粒径はやや大きい¹¹⁾。これらの知見に対し, 第2群の集水域を構成する火山岩類は, 土砂の流送過程における摩耗が小さいことから¹⁶⁾, 集水域からの流出土砂の粒径は第1群が最も小さく, 第3群, 第2群の順で大きくなったと考えられる。ただし, ここで示したStream Powerと流入土砂量の相関係数の数値は全般的に非常に小さく, 強い相関関係(R^2 値 > 0.5)を見出せなかった。特に第3群では, 横軸の大小に関わらず土砂が流入する傾向がみられた(図-5, 6右参照)。今後, データ数を増やすとともに, 他の要因の影響についても併せて検討する必要があると思われる。

4. おわりに

伊勢湾流域圏における対象ダム11基の集水域は, その表層地質, 地形特性, 土地被覆といった景観的特徴により, 3つのグループに類型化された。主成分分析の結果に拠れば, この分類は表層地質構成に依存し, 深成岩類, 火山岩類, 堆積岩類から構成されていた。

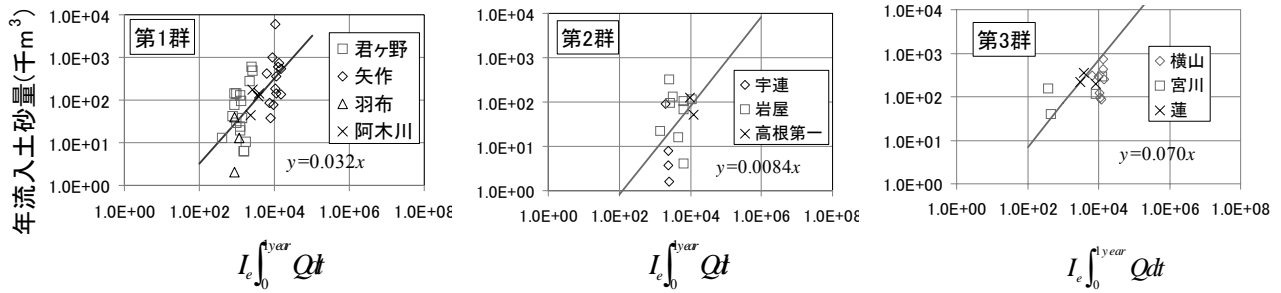


図-5 掃流砂型流砂量式におけるStream Powerと流入土砂量の関係

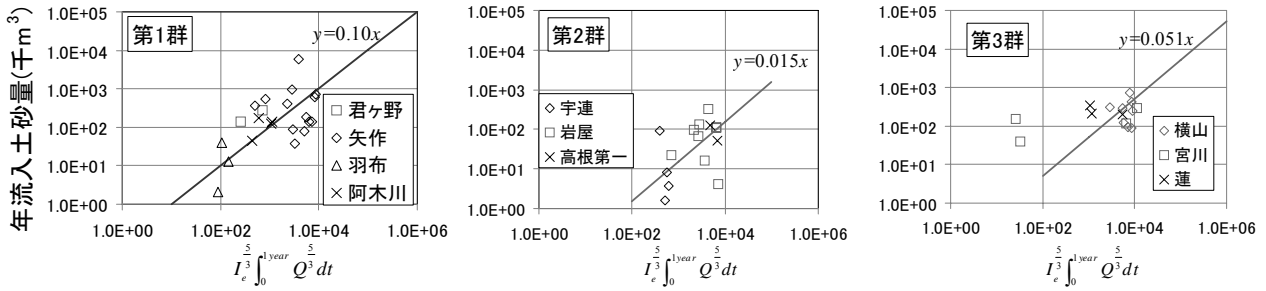


図-6 全流砂型流砂量式におけるStream Powerと流入土砂量の関係

この分類群ごとに水・土砂流入量の関係のみたところ、掃流砂型、全流砂型の既往の土砂水理モデルとの適合性は大きく異なり、各グループの特徴が明確に示された。これらの結果から、集水域の特性は表層地質構成に大きく影響され、土砂生産特性もそれに応じたものとなっていることが示唆された。ただし、本検討において、両水理モデルの説明力は高く無く、今後はさらに、表層土壌の発達状況、森林組成などを考慮した分析を行い、土砂生産の評価精度を高めていく必要があると考えられる。

謝辞：本研究は、科学技術振興調整費委託事業「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」の一環として行った。表層地質データは産業技術総合研究所地質調査総合センターに、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、愛知県、三重県、独立行政法人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。ここに記して、関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば、磯野俊彦：国土管理の基本となる流砂系土砂管理，学術の動向・特集2 明日の社会的共通資産—建設系分野からの重点研究課題提案—，pp.52-53，2008。
- 2) 吉良八郎：ダム計画と堆砂（その2），農業土木学会誌，Vol.50，No.12，pp.1051-1055，1982。
- 3) 相澤泰造：三重の地質と斜面リスクマネジメント，（財）三重県建設技術センター，120p，2005。
- 4) 村上泰啓，山下章詞：山地丘陵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。
- 5) 井上大榮，角田隆彦，河村邦夫，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。

- 6) 岡野真久，高柳淳二，藤井隆弘，安藤明宏：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—土砂生産強度マップ開発の事例—，ダム工学，Vol.14，No.3，pp.167-176，2004。
- 7) 長谷川浩一，若松功寿江，松岡昌志：ダム堆砂データに基づく日本全国の潜在的侵食速度分布，自然災害科学，Vol.24，No.3，pp.287-301，2005。
- 8) 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。
- 9) 竹村公太郎，鈴木徳行：流出土砂量の要因と予測に関する研究，土木学会論文集，No.621/II-47，pp.101-109，1999。
- 10) 鈴木隆介：建設技術者のための地研読書入門，第3巻段丘・丘陵・山地，古今書院，東京，942p，2000。
- 11) 田代喬，佐藤圭輔，中村直斗，登立公平，辻本哲郎：流域の地質構造・地研特性に着目した河川景観の階層性の分析，河川技術論文集，Vol.13，pp.279-284，2007。
- 12) Brune, G.M: Trap efficiency of reservoirs, Trans. AGU, Vol.34, No.3, pp.407-418, 1953.
- 13) 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。
- 14) 例えば，Verstrae, G. and Poesen, J.: Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds, Progress in Physical Geography, Vol.24, No.2, pp.219-251, 2000.
- 15) 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。
- 16) 宮崎洋三，田淵政一，児玉敏雄，羅強：貯水池の堆砂実績から見た流域からの土砂流出，土木学会論文集，No.782/II-70，pp.131-141，2005。
- 17) 今井正直：河川特性としての河床材料の質について，平成12年度部外研究員報告書概要版，土木研究センター，pp.31-34，2001。（2010.4.8受付）