

# 山地流域における土砂生産特性 に表層地質構成が及ぼす影響

EFFECTS OF GEOLOGIC DISTRIBUTION ON SEDIMENT YIELDS  
IN MOUNTAINOUS WATERSHEDS

田代 喬<sup>1</sup>・高木 良<sup>2</sup>・辻本 哲郎<sup>3</sup>

Takashi TASHIRO, Ryo TAKAGI and Tetsuro TSUJIMOTO

<sup>1</sup>正会員 博(工) 名古屋大学大学院助教 工学研究科社会基盤工学専攻  
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町1番地)

<sup>2</sup>学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

<sup>3</sup>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 yields depend on topography, geology, land cover, hydrological and meteorological conditions and effect deposited material composition on river or stream bed. This study was conducted to clarify the difference of characteristics of sediment yields with the macro-scale surface geological information. We analyzed the numeric data of terrains, land covers, daily rainfalls and annual sediment depositions at the upstream of dam in the each watershed of homogeneous geology by using the geographical information system. By comparing typical watersheds of heterogeneous geology, it could be finally examined that there is the relationship of multiple regression between the annual sediment yields and some parameters of rainfall characteristics in the each watershed of homogeneous geology.

**Key Words :** *Sediment yields, mountainous watershed, surface geology, rainfall characteristics, geographical information system*

## 1. はじめに

国土管理においては、治山・砂防・河川・海岸事業を通じ、流砂系を一貫した総合的な土砂管理が不可欠とされている<sup>1)</sup>。中でも土砂生産は流砂系のスタート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<sup>2,3)</sup>。

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<sup>4)</sup>、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ります<sup>5-7)</sup>、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示している<sup>4-7)</sup>。ただし、前者は土砂災害を緊急的に取り扱うことが多く、後者の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、地質構成、地被条件が複合的であるため、表層地質構成が土砂生産に及ぼす影響について系統的な記述がなされているとは言い難い。井上<sup>5)</sup>は、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。このことは、崩壊地が貯水池堆砂の第1次供給源であって、発生土砂の大半が遅れながらも最終的には貯水池に流入することを支持するものである。換言すれば、土砂災害などの緊急性が無い場合には、貯水池における堆砂データの土砂生産特性把握における有用性を示すものと言える。

一方、上記のような単一流域に収まらない、(場合によっては)全国的スケールを有する事例以外に、それらとは対照的に比較的狭い地域を扱った研究も存在する。中小規模の河川流域を対象として、河床材料の礫種構成<sup>8),9)</sup>、鉱物組成<sup>10)</sup>、元素組成<sup>11),12)</sup>の変化に着目して土砂の発生起源を推定した研究は、流程における物質組成変化に着目し、水路が流下・混合・分派する過程における上流からの土砂供給量比を定性・定量的に明らかにしたものである。また最近では、花崗岩など特定の岩石表層における風化作用による土砂発生量を計測した報告<sup>13)</sup>もなされてきた。これらの研究は前述したマクロスケールの研究事例に比べ、個別事象の土砂生産(発生)機構へのアクセスが容易であり、今後の発展が期待されるとこ

ると言えるだろう。

以上のような問題意識に鑑み、表層地質構成が土砂生産特性に及ぼす影響を理解するため、本研究では単相地質区分によって構成され、かつ、土砂貯留量が連続的に観測されている「ミクロ」な流域を対象として、地形データ、地被条件、降雨データと土砂生産特性の関係を調べ、流域の表層地質が土砂生産能に及ぼす影響について考察した。ここでの土砂貯留量は小規模ダム（貯砂ダム、砂防ダム）の堆砂量とし、表層地質以外の要因を排除した検討を行うため、はじめに流域地形特性を分析し、類似した地形特性を呈しながら異なる表層地質構成の小流域を対象とした。この際、対象小流域の流末に小規模ダム（貯砂ダムか砂防ダム）が含まれるよう調整した。

## 2. 表層地質からみた流域地形量の解析

### (1) 調査地の概要

調査対象としたのは、中央構造線が左右に横断することにより、南北に多様な地質構造を呈する三重県の雲出川、櫛田川、宮川流域である。図-1に示すように、櫛田川流域に位置する中央構造線より北側の内帯に雲出川流域が、これより南側の外帯に宮川流域が位置する。雲出川流域にはその他の区分も局在するが一般的には、中央構造線より北側で土砂生産が活発な風化花崗岩を有する領家帯、これより南に位置し急峻な地形を形成する三波川帯および秩父帯として知られる<sup>3)</sup>。

表層地質による土砂生産特性を考察するために、各流域における単独の占有率がそれぞれ75%以上が確保されることを条件として調査地を選定したところ、現世層、四万十帯を除く各地質区分からそれぞれ3流域（合計9流域）が抽出された（図-1参照）。なお、ここでの地質図は「20万分の1日本シームレス地質図データベース（産業技術総合研究所地質調査総合センター、2007）」をもとに、秩父帯、三波川帯、四万十帯、現世層（沖積層）、領家帯に区分したものである。

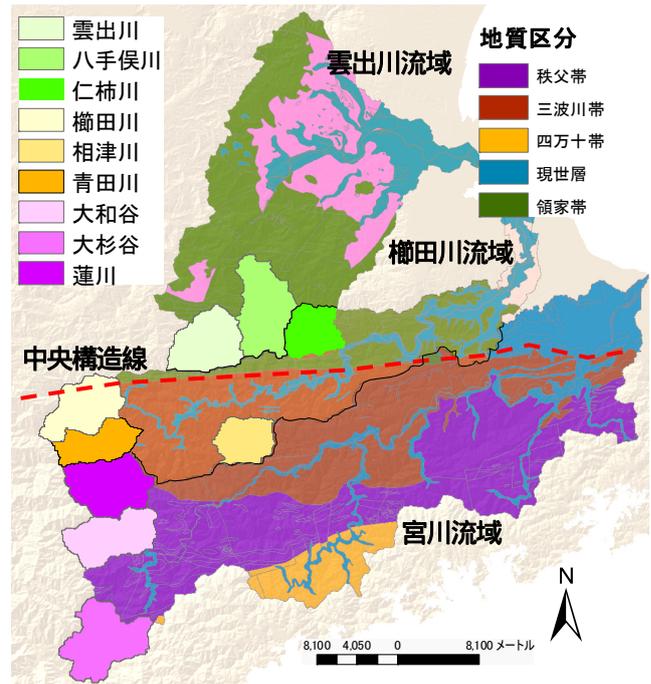


図-1 対象地域における表層地質分布と調査地（9流域）

### (2) 解析方法

田代ら<sup>14)</sup>を参考に、Arc View 9.2（ESRIジャパン株式会社）を情報抽出、演算に用いた。表-1には、各調査地における流域面積、起伏比<sup>15)</sup>、円形度<sup>16)</sup>、1次水流頻度<sup>15)</sup>、水流頻度<sup>15)</sup>、水流密度<sup>15)</sup>、平均標高、標高の変動係数を示す。これら流域地形量については以下に解説を加えるが、その算出に当たっては、「数値地図25000（空間データ基盤）（国土地理院、2002）」に収録されている数値標高データ（50mメッシュ）と「国土数値情報（流路（線））（国土庁、2001）」による河川の位置情報を用いた。

#### a) 起伏比

起伏比 $R_b$ <sup>15)</sup>には最大起伏比と流域起伏比があるが、ここでは最大起伏を最高点距離で除した最大起伏比を用いた。起伏比は流域の急峻さを表し、水や土砂の流出の制限要因であるとされている<sup>17)</sup>。

表-1 調査地（9流域）の地形特性量

	雲出川	八手俣川	仁柿川	櫛田川	相津川	青田川	大和谷	大杉谷	蓮川
面積[km <sup>2</sup> ]	36.91	43.75	24.66	34.93	23.78	26.00	37.23	45.65	40.50
円形度	0.43	0.30	0.43	0.36	0.41	0.31	0.36	0.30	0.39
起伏比	0.12	0.08	0.15	0.12	0.18	0.14	0.16	0.18	0.18
1次水流頻度[m <sup>2</sup> ]	1.00	0.87	1.09	1.00	0.59	0.73	0.94	0.68	0.59
水流頻度[m <sup>2</sup> ]	2.00	1.71	1.91	1.83	1.01	1.39	1.75	1.42	1.14
水流密度[m <sup>-1</sup> ]	1.01	1.05	1.12	1.02	1.06	0.98	0.95	1.00	0.95
平均標高[m]	617	514	376	703	367	858	846	1028	871
標高の変動係数	0.30	0.22	0.45	0.33	0.37	0.32	0.29	0.27	0.30

（ただし、雲出・八手俣・仁柿は領家帯、櫛田・相津・青田は三波川帯、大和谷・大杉谷・蓮は秩父帯に位置する）

b) 円形度

円形度 $R_c$ <sup>16)</sup>は流域の平面形状を示し次式で定義される。

$$R_c = 4\pi A_b / P_b^2 \quad (1)$$

ここで、 $A_b$ ：流域面積、 $P_b$ ：流域周長である。流域面積が同じならば、細長い流域より幅の広い流域の方が河谷発達の進んだ状態にあり、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ことから、河川景観を判断するには重要な指標と考えられる<sup>17)</sup>。

c) 水流頻度と水流密度

単位面積当たりの谷線の発達程度を表したもので、全水流次数の総本数または総流路延長を流域面積で除すことにより、水流頻度<sup>15)</sup>または水流密度<sup>15)</sup>が得られる<sup>17)</sup>。ここで算出した各地形量（円形度，起伏比，1次水流頻度，水流頻度，水流密度，標高の変動係数）はそれぞれについて地質区分ごとに比較するとともに，流域特性を各地形量の複合的な影響として考察するため，全6変数を用いて主成分分析を行った。

(3) 結果と考察

はじめに，表層地質区分による地形特性の違いを個別に検証する。地質区分ごとにすべての地形特性量（表-1）には正規性（危険率 $P < 0.01$ ），異なるケース（地質区分）間において各変数には等分散性（ $P < 0.01$ ）が確認されたため，こうした前提条件を満たす場合にケース間の変数の違いを解析可能な一元配置分散分析を実施した。その結果，いずれの地形特性量においても表層地質による有意な差（ $P < 0.05$ ）は検出されなかったが，起伏比（ $P = 0.086$ ），水流密度（ $P = 0.097$ ）において危険率 $P$ が相対的に小さい顕著な差（ $P < 0.1$ ）が確認された。すなわち，起伏比は秩父帯，三波川帯，領家帯の順で小さくなるのに対し，水流密度はその逆の傾向を示した。本川に合流する1次支川流域を対象とした田代ら<sup>14)</sup>は，地質によって地形の急峻度が異なる可能性を示唆しており，本検討でもこの仮説は支持されるものと考えられた。

さらに，上記地形変量の6変数を用いて主成分分析を行ったところ，第3主成分までの累積寄与率が大きく，91.9%に達した。表-2には使用した6変数と各主成分の因子負荷量を，図-2には第1，2主成分で展開された散布図を示す。表より，横軸に寄与するのは1次水流頻度，水流頻度であり，縦軸に寄与するのは標高の変動係数のみであることから，流路網と地形急峻度の違いによって，流域の地形特性を識別できるものと思われた。図中の地質区分に着目すると，秩父帯，三波川帯，領家帯の順で水流頻度が大きくなる一方，標高の変動係数については地質区分による違いが見出せなかった。これらの結果から複合的な影響を考慮しても表層地質構成による地形特性の違いを必ずしも明示できたとは言えない。しかしながら，図-2のプロット間の位置関係を見れば，少なくとも類似した地形特性を有する流域を抽出でき，これに該

表-2 主成分分析における使用6変数，各主成分の因子負荷量と寄与率（太字： $P < 0.05$ ）

	PC1	PC2	PC3
円形度	0.50	0.67	0.37
起伏比	-0.61	0.67	0.25
1次水流頻度	<b>0.93</b>	-0.22	0.20
水流頻度	<b>0.86</b>	-0.42	0.24
水流密度	0.66	0.39	-0.63
標高の変動係数	0.46	<b>0.83</b>	-0.03
寄与率(%)	47.8	32.6	11.5

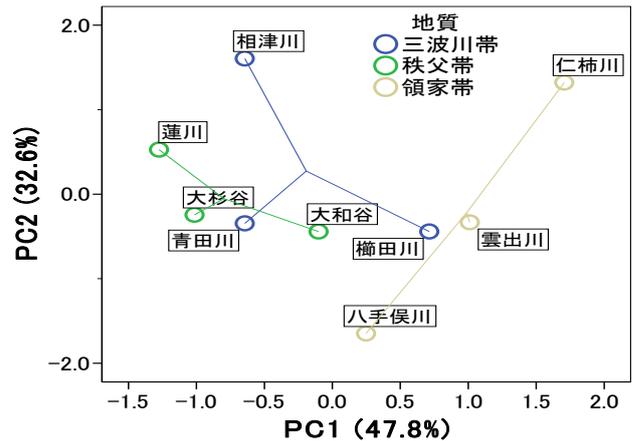


図-2 表層地質構成の異なる流域を対象とした地形特性に関する主成分分析（括弧内は各主成分の寄与率）

当するものとしては，蓮川・大杉谷・大和谷（秩父帯）と青田川（三波川帯），あるいは，大和谷（秩父帯），榑田川（三波川帯），雲出川（領家帯）といった組み合わせが挙げられた。すなわち，この組み合わせを比較することにより，表層地質構成が土砂生産に及ぼす影響を直接的に検証できる可能性がある。

3. 表層地質からみた土砂生産特性

前章において抽出された，流域の地形特性が類似しながらも構成地質が異なる組み合わせの中から，青田川（三波川帯）と蓮川（秩父帯）に着目した。両流域は榑田川上流域の蓮ダム上流に位置して隣接し，ともに貯砂ダムを流末に有し，背水区間における土砂貯留量の推定が可能である。

(1) 調査地の概要

調査地である青田川と蓮川の地形量は表-1に示す通りであり，前記によって相対的な類似性が確認されているが，蓮川の方がやや流域面積が大きい。土地利用状況について「国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ（国土庁，1999）」を用いた整理に拠れば，両流域とも

90%以上を森林が占めており、市街地はほとんどないが、蓮川でわずかに荒地の割合が大きかった。また、調査地は日本有数の多雨地帯である大台ヶ原と隣接しており、年間降水量が平成元年から平成13年までの平均で約2500mmを超える多雨地帯である。

これら2流域の下流に位置する蓮ダムは、1991年9月に竣工し、同時期に2つの貯砂ダムも運用を開始している。それ以降、国土交通省蓮ダム管理所によって周辺5地点における雨量観測、本ダム・貯砂ダム背水区間における堆砂量モニタリングが進められてきた。ここではこれらのデータを用いて分析を行う。

## (2) 解析の方法

土砂貯留量は、毎年、縦断方向200m間隔で実施されてきた横断測量をもとに推定した。すなわち、貯砂ダム上流の背水区間（蓮川：700m長、青田川：500m長）における各年の河床横断面の面積変化と縦断方向距離の積算により算出し、各貯砂ダムの背水区間内における砂利採取実績を考慮して算定した。また、降雨特性による影響を考察するため、蓮ダム管理所が管轄する木屋谷、千石平、田引、蓮ダム、波瀬の5つの雨量観測所における日雨量データを用いて各流域の平均雨量を推定したうえで、欠測日数の多かった2000年を除いて1993~2008年における年総雨量、最大雨量、降雨日数、最大ひと雨雨量、連続無降雨日数の最大値を算定した。表-3には、各流域におけるこれらの平均値と標準偏差を示す。ここでひと雨雨量とは、日降雨が0でない降雨日が連続した期間の総雨量であることから<sup>18)</sup>、最大ひと雨雨量はその年最大値を示す。

貯砂ダム堆砂量を目的変数とし、上記降雨特性5変数を説明変数とする単回帰分析、重回帰分析を実施した。後者では、 $F$ 値（= 偏回帰係数 / 偏回帰係数の標準偏差）の自乗が2以上の変数のみを抽出する変数減少法<sup>19)</sup>を採用するものとした。

## (3) 結果と考察

図-3には、各調査地で得られた貯砂ダムの比堆砂量（比土砂貯留量）の経年変化を示す。年平均値は蓮川（秩父帯）で $251\text{m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ 、青田川（三波川帯）で $11\text{m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ となったが、標準偏差は蓮川で $698\text{m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ 、青田川で $579\text{m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ とバラつきが大きく、隣接流域でほぼ同様の降雨傾向（表-3参照）ながら貯留量の多い年に不一致が確認され、顕著な差は見出せなかった（対応のある $t$ 検定、 $P=0.19$ ）。また、いずれの貯砂ダムにおいても比堆砂量が負となる年も複数見られ、土砂が流出している可能性も示唆されたが、本検討で各貯砂ダムにおける堆砂量推定に用いた測量横断面は3~4地点に限られているため、厳密な貯留量推定には至っていないと推察される。ただし、対象スケール、算定手法は統一されており、両貯砂ダム地点における土砂貯留量、土砂生産

表-3 対象流域における降雨特性量の平均値と標準偏差  
(太字:  $P < 0.05$ , 対応のある  $t$  検定)

	蓮貯砂ダム	青田貯砂ダム
年総降雨量 (mm)	2631±682	2656±644
<b>最大雨量 (mm)</b>	314±164	287±154
降雨日数 (day)	154±16	164±16
最大ひと雨雨量 (day)	567±326	526±284
<b>連続無降雨日数最大値 (day)</b>	11±4	11±4

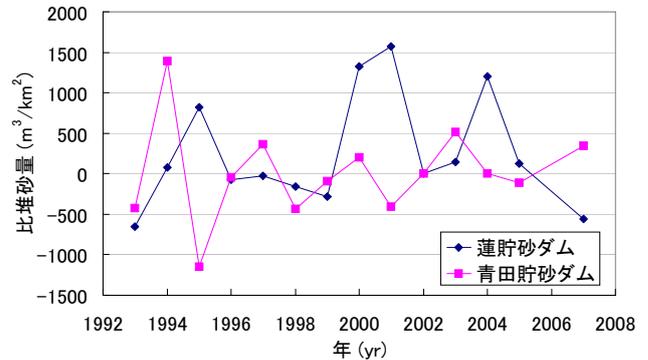


図-3 各調査地で得られた貯砂ダムの比堆砂量

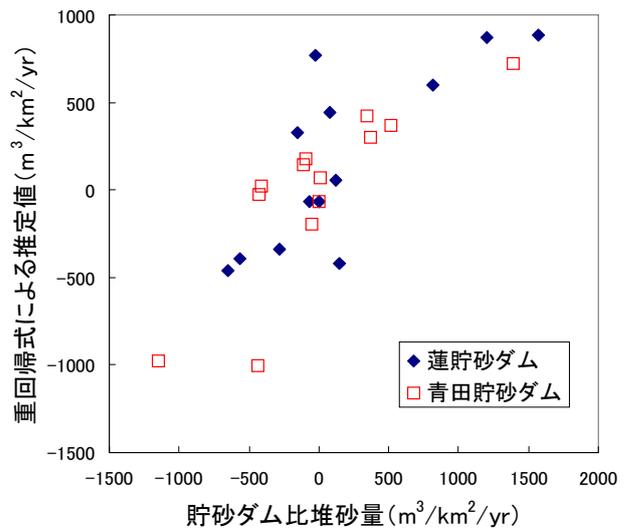


図-4 貯砂ダム比堆砂量と重回帰分析による推定値の関係

特性について相对比较が可能な精度は保持されているものと考えられた。

次に、構成地質、地形特性、土地利用・被度が対象期間を通じて同様であると仮定し（2.参照）、降雨による土砂生産の変化について分析を行った。具体的には、対象2流域それぞれの各年（1993~2007年）において、年総降雨量、日最大雨量、降雨日数、最大ひと雨雨量、連続無降雨日数の最大値と貯砂ダム比堆砂量との関係を調べた。比堆砂量とこれら5つの降雨特性量の合計6変数のうち、各2変数間についてスピアマンの順位相関係数の検定を行ったところ、蓮、青田両貯砂ダムの比堆砂量

と有意な相関関係を示すものは無かった。降雨特性量の相互間では、総降雨量とひと雨最大雨量（蓮： $r = 0.610$ ,  $P = 0.027$  / 青田： $r = 0.637$ ,  $P = 0.019$ ）、日最大雨量と最大ひと雨雨量（蓮： $r = 0.637$ ,  $P = 0.019$  / 青田： $r = 0.681$ ,  $P = 0.010$ ）にのみ有意な相関関係が示された。ここで、 $r$ ：スピアマンの順位相関係数、 $P$ ：有意確率である。したがって、比堆砂量は単独の降雨特性量では説明し得ないことが示され、ここでの降雨特性に関する5変数はそれぞれ独立と見なせるものと考えられた。

さらにこの結果を受けて、貯砂ダム比堆砂量を目的変数 $y$ とし、降雨特性に関する上記5変数（年総降雨量 $x_1$ 、日最大雨量 $x_2$ 、降雨日数 $x_3$ 、最大ひと雨雨量 $x_4$ 、連続無降雨日数の最大値 $x_5$ ）を説明変数とする重回帰分析を実施した。結果として、貯砂ダムの比堆砂量を降雨特性と結びつけた以下の2つの推定式が得られ、実測比堆砂量と推定値の関係は図-4に示される。

$$y = -1.2x_1 + 2.8x_2 - 33.0x_3 - 2.4x_4 + 96.2x_5 + 1419.3$$

$$\text{(蓮川土砂貯留量推定式, } P=0.173 \text{)} \quad (2)$$

$$y = -0.5x_1 + 2.4x_2 - 135.3x_5 + 2065.8$$

$$\text{(青田川土砂貯留量推定式, } P=0.012 \text{)} \quad (3)$$

図より、いずれの推定式も比較的良好な再現性を呈することが確認された。しかし、蓮貯砂ダムの比堆砂量に関する推定式(2)については変数が選択されず、統計的に有意な関係は得られなかった。一方、青田貯砂ダムの推定式(3)は、年総降雨量( $x_1$ )、日最大雨量( $x_2$ )、連続無降雨日数の最大値( $x_5$ )が選択され、かつ統計的に有意な関係が得られた。さらに各変数の寄与度合いに着目して、各変数の示す数値の範囲による影響を除くため、標準偏回帰係数を算出したところ、蓮川では総降雨量 $x_1$  (1.249)、日最大雨量 $x_2$  (0.740)、連続無降雨日数の最大値 $x_5$  (0.511)で正の効果、最大ひと雨雨量(-1.164)  $x_4$ 、降雨日数 $x_3$  (-0.749)で負の影響が確認された一方、青田川では日最大雨量 $x_2$  (0.622)で正の効果、連続無降雨日数の最大値 $x_5$  (-0.748)、総降雨量 $x_1$  (-0.515)で負の影響が確認された。

これらの結果から各流域における土砂生産を考えるに、

蓮川流域(秩父帯)では土壌がある程度乾燥した状態で短期間にまとまって降る降雨(例えば、数時間の集中豪雨)が土砂生産に寄与しているものと類推され、青田川流域(三波川帯)では、湿潤状態の土壌に短期間にまとまって降る降雨が土砂生産を引き起こしているものと推察された。両調査地におけるこのような降雨に対する応答の違いは、既往研究において報告されてきた、表層地質によって斜面崩壊、ひいては土砂生産特性が異なる事実<sup>2)7)</sup>を支持するものであると考えられた。特に、

「三重の地質と斜面リスクマネジメント」を著した相澤が、三波川帯地質区分における斜面崩壊について「含水率が高い土壌で「地すべり」が頻発する」と指摘した一節<sup>3)</sup>については、青田川流域における土砂生産特性に関する分析( )と良好な一致をみており、特筆に価するものと思われた。一方、蓮川流域におけるそれ( )については、雨滴による土壌侵食が影響している可能性が示唆された。恩田が主催する研究プロジェクト<sup>20)</sup>によれば、ヒノキ林などの人工林では「乾燥」状態で生成された土壌の撥水性が降雨時の表面流出を増大させることにより、降雨直後の土壌に浸透する前の「新しい水」が土砂流出に大きく寄与する事例が報告されている。本検討の調査地周辺は林業が盛んな地域であり、蓮川流域で表層土壌が発達している状況があれば、同様の現象が土砂生産に寄与している可能性も十分に考えられる。

#### 4. おわりに

本研究は、表層地質構成が土砂生産特性に及ぼす影響を調べることを目的とした。はじめに、領家帯、三波川帯、秩父帯の各地質区分が占有する小流域を複数選定し、流域の地形特性を分析した。次に、この分析により似通った地形と判断された流域のうち、流末に貯砂ダムを有する青田川(三波川帯)、蓮川(秩父帯)を対象として、ダム背水区間の堆砂量を評価した。

結果的に、表層地質が流域の地形特性に与える影響は不明瞭であったが、類似した地形を備えていて表層地質の異なる流域では、降雨に対する生産土砂の反応が異なる傾向を見出すことができた。なお、この関係については、降雨特性量を説明変数とする土砂貯留量推定式(重回帰式)が得られており、蓮川流域(秩父帯)では土壌がある程度乾燥した状態で短期間にまとまって降る降雨(例えば、数時間の集中豪雨)が土砂生産に寄与し、青田川流域(三波川帯)では、湿潤状態の土壌に短期間にまとまって降る降雨が土砂生産を引き起こしている可能性が示唆された。これらは既往の文献記述とも良好な一致を見ており、山地流域における土砂生産特性に表層地質構成が及ぼす影響を部分的に明らかにできた。

ただし、本検討は、各年の流域における降雨と貯砂ダムにおける土砂貯留量を直接的に結びつけて行ったものであり、極論すれば、土砂の生産から河道への流出、貯留までの一連の過程が各年で完了するという仮定に基づいたものである。今後はこうした前提条件の妥当性を検証したうえで、対象2流域における人工林の分布など土地被覆状況、表層土壌の発達状況などを精査し、降雨と流出に着目しながら土砂の生産、貯留、流出、運搬過程の理解を進める必要があると思われる。

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」（代表：辻本哲郎），ならびに，WEC応用生態研究助成「流域の地質構成からみた貯水池の堆砂管理に資する土砂生産機構とその生態的影響（2008-05）」（代表：田代喬）により行った．研究遂行上，必要不可欠な貯砂ダム上流の横断測量データ，降水量データについては，国土交通省運ダム管理所に提供いただいた．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提供いただいた．また，立命館大学理工学部講師（前名古屋大学研究員）の佐藤圭輔博士には，地理情報の整理・分析に関する助言をいただいた．匿名査読者の方々には，本質的で重要な指摘をいただいた．ここに記して関係各位に謝意を表す．

#### 参考文献

- 1) 例えば，磯部雅彦：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，山下彰司：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．
- 5) 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．
- 6) 岡野眞久，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—土砂生産量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，若松加寿江，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) 榎本政雄，佐藤昭夫，山本兼次，岡田勝彦：神通川流域における河床堆積砂礫岩種別分類（第1報）—砂礫流出比計算の一方法—，新砂防，Vol.20，No.3，pp.9-20，1967．
- 9) 平林桂：河床材料の岩質組成の縦断変化に着目した笛吹川の小流域別土砂供給量の推定，水工学論文集，Vol.44，2000．
- 10) Sisinggih, D., Sunada, K. and Oishi, S.: Prediction of reservoir's lifetime based on the erosion and sedimentation on Sengguruh and Sutami Reservoirs, Indonesia, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.49, pp.1063-1068, 2005.
- 11) 島谷幸宏，埜村和孝，河口洋一：北川流域における堆積土砂成分の縦断分布，河川技術論文集，Vol.12，pp.305-310，2006．
- 12) 田代喬，登立公平，辻本哲郎：流域地質構造が河床材料特性の流下方向変化に及ぼす影響，河川技術論文集，Vol.14，pp.121-126，2008．
- 13) 例えば，堤 大三，藤田正治，伊藤元洋，手島宏之，澤田豊明，小杉賢一朗，水山高久：凍結融解による土砂生産に関する基礎的研究 - 田上山地裸地斜面における現地観測と数値シミュレーション - ，砂防学会誌，Vol.59，No.6，pp. 3-13，2007．
- 14) 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・地形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．
- 15) Shumm, S.A.: The evolution of drainage systems and slopes in badland at Perth Amboy, New Jersey, *Geological Society of America, Bulletin*, Vol.67, pp.597-646, 1956.
- 16) Miller, V.G.: A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch mountain area, Va. and Ten., *Office Naval Research Project, NR 389-042, Technical Report*, Vol.3, Columbia University, 1953.
- 17) 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門，第3巻 段丘・丘陵・山地，古今書院，東京，942p，2000．
- 18) 近森秀高，永井明博：岡山における日降雨特性の経年変化，水文資源学会誌，Vol.15，No.5，pp.513-521，2002．
- 19) 例えば，柳井久江：4 Steps エクセル統計[第2版]，（有）オーエムエス出版，所沢，270p，2004．
- 20) 例えば，恩田裕一：人工林荒廃と水・土砂流出の実態，岩波書店，東京，245p，2008．

（2010.9.30受付）