山地流域における土砂生産

高原川流域における観測研究

藤田正治・澤田豊明・志田正雄・伊藤元洋^{*}

* 京都大学大学院工学研究科

要旨

流域土砂管理においては,土砂生産の実態を時系列的に解明し,生産土砂の量と質 を予測するモデルを構築することが重要である。本研究では,高原川流域で行われて いる個々の裸地における土砂生産の直接的観測および一つの流域における間接的な土 砂生産量の解析から,凍結融解や降雨に起因した土砂生産の特性について検討した。 その結果,通常時,凍結融解によって作られる土砂生産場の状態が生産土砂量に大き な影響を与えるため,生産土砂量は降雨量とあまり相関がないことなどが示された。

キーワード:土砂生産,凍結融解,山地流域,裸地,総合的土砂管理,土砂流出

1. はじめに

流域における土砂生産は流砂系における土砂供給 条件を決定づける現象であり,流域の土砂災害や河川 環境問題を考える上でその量と質を知ることは重要 な問題である。これまで,土砂生産に関しては,多く の研究が行われ,土砂生産機構が明確にされ,生産量 の推定式(たとえば,河村,1982)も提案されている。 この結果,個々の土砂生産現象については定性的には かなりわかってきたが,裸地における土壌侵食に問題 を限ったとしても,土砂生産量の推定が十分行えると は言い難い。これは,土砂生産量の推定が十分行えると は言い難い。これは,土砂生産量の推定が十分行えると は言い難い。これは,土砂生産量の推定が十分行えると とが難しいこと,実斜面での長期的なデータがないこ となどによると考えられる。

最近,流紗系の土砂管理,物質輸送の問題などの重 要性が指摘されており,土砂生産のモニタリングと予 測の必要性が強調されている。そこで,本研究では, これからの土砂生産量算定手法の開発に向けて,穂高 砂防観測所の試験流域における長期にわたる土砂生産 や土砂動態に関する観測結果から,山地流域の土砂生 産特性について検討するものである。まず,穂高砂防 観測所で行われている個々の裸地における土砂生産の 直接的長期観測から,個々の裸地における土砂生産の 量と質の季節変化特性,長期的データを使った降雨量 と土砂生産量の相関などを考察する。つぎに,1つの 流域における土砂収支から求められる間接的な土砂生 産量の解析から,流域全体としての凍結融解や降雨に 起因した土砂生産の特性について検討する。

2. 個々の斜面における土砂生産特性

著者らは神通川水系高原川流域において,1985年から裸地斜面における土砂生産の実態について,積雪期を除く期間を通して,毎週土砂生産量の調査を実施している。ここでは,2002年における土砂生産の時間変化特性と1985年から約20年にわたる観測から土砂生産量と降雨量との関係,生産土砂の質の季節変化特性について解析する。

2.1 土砂生産の調査法と場の特性

土砂生産調査は裸地斜面内に試験斜面を設定して 行っている。試験斜面は地質,斜面勾配,斜面規模, 交通の利便性などを考慮して 11 箇所に設けられてい る。また 試験斜面長が長いと土砂生産量も多くなり, 測定が困難になるので,試験斜面の長さが 3mから 5 mの場所を選んでいる。斜面下流端に,幅 1mの土砂 採集ボックスを設置し,このボックスに入った土砂を 毎週採集し,重量と粒径分布を測定している。土砂生 産には降雨量が大きく関わっているので,試験斜面に 近い雨量計で雨量データの収集を行っている。また, 試験斜面は自然状態を保つように除草などもおこなっ ていない。



Fig. 1 Locations of the experimental slopes and the geological map

Table 1 Characteristics of each slope and the sediment production volume latest 3 years

No.	Geology	Compressive strength (kg/cm ²)	Slope angle (°)	2000 (g/m ² week)	2001 (g/m ² week)	2002 (g/m ² /week)
1	Rhyolite	5.0	52	39	27	335
2	Rhyolite	10.5	54	12	5	475
3	Rhyolite	3.3	50	5	6	107
6	Mudstone	3.8	60	37	45	47
7	Andesite	0.9	55	189	69	52
8	Rhyolite	0.6	42	14	11	175
9	Rhyolite	0.5	35	17	11	287
11	Granite	2.8	48	-	-	253



Fig. 2 Time series of sediment production volume and weekly rainfall

試験斜面の位置は Fig. 1の番号に示す通りである。 この図には流域の地質も示している。この 11 箇所の内, 現在4および5番は道路改修によって消失し,10番は 植生の回復によって土砂生産が認められなくなってい る。Table1はこの3箇所を除いた各試験地の地質,斜 面勾配,圧縮強度,過去3年間の平均土砂量を示した ものである。

2.2 土砂生産の短期的特性

2002 年における土砂生産量と降雨の関係について 検討する。まず, Fig. 2は, 深谷試験地(No.7)におけ る土砂生産量と降雨量の関係を時系列的に示したもの である。この試験地は観測所の近くにあり, 焼岳火山 噴出物の堆積層に発生している裸地斜面である。土砂 生産量は1週間単位,1平方メートル単位で示してい る。降雨量は1週間の総雨量で示している。この雨量 は穂高砂防観測所の構内の雨量である。観測は4月1 日に開始され 最初の土砂採集は8日に行われている。 土砂生産が開始されたのは5月21日から28日の間で, 約50gと非常に少ないが 降雨量も約25mmで少ない。 次に土砂生産が発生するのは,3週間後であり約70mm の降雨量で約 650gの土砂量が発生している。この値 はこの年の年間最大値を示している。次に土砂生産が あるのは2週間後で同程度の降雨量に対して約100g と非常に少ない。2週間後に降雨量が約280mm に達し ているにも関わらず土砂が発生していない。その後は 降雨に対応して土砂が生産されている傾向が認められ る。しかし,降雨量に比例して土砂生産量が発生して いるようには認められない。土砂生産にとって降雨は 重要な外力ではあるが,これに比例して土砂生産量が 増加していない。この理由の一つとして,裸地斜面か ら雪が融け,凍結・融解が発生することによって斜面 を構成する土砂が斜面から離れ,地表付近の土砂の結 合力は小さくなる。その後,その結合力の弱くなった

部分が雨滴や表面流によって移動する。その結果,裸 地斜面の結合力の弱くなった部分がなくなり,その下 部の結合力の大きな部分が斜面表層部を構成すること になり,斜面の場の状態は履歴的に変化する。このよ うな傾向は他の地点でも同様であった。

つぎに, Fig. 3 に示す生産土砂の粒径分布の特性か ら土砂生産について検討してみる。図の粒径分布に示 されるように,季節によって生産土砂の粒径分布に大 きな変化が認められる。5月28日および6月18日の 粒径分布は同じ傾向を示し、観測値の中で最も細粒径 になっている。その後,時間の経過とともに生産土砂 の粒径は大きくなり,10月2日で最大となる。最終の 土砂生産になる11月12日は粒径分布の形状が変わり 粒径は小さくなっている。11月6日に観測所 標高1150 m)で約30cmの積雪があり,また11月入って観測 所付近での気温が零下を記録するようになり,凍結・ 融解が発生したことも一因として考えられる。

粒度分布およびその季節変化特性は地質によって異なり,たとえば古生層の平湯試験地(No.6)では Fig. 3 と同様の傾向があるが,その変動幅は小さい。

以上、裸地斜面における土砂生産について試験斜面 の観測結果について述べたが,土砂生産は6月から7 月と9月から10月に発生し、降雨量との相関は良くな い。生産土砂量は試験地によって異なるが,生産土砂 の粒径も地質などを反映して大きく異なっている。ま た,生産土砂の粒径が季節的に変化していることなど がわかった。

2.3 土砂生産の長期特性

1985 年から約 20 年間の土砂生産特性の変化につい て検討する。Fig. 4 は 1 週間を単位として,生産土砂 量と降雨量の関係を示したものである。図中の番号は Fig. 1 に対応している。この図から降雨量と土砂生産 量の間に一義的な関係がないことがわかる。また,多 くのデータは 0~500g/week/m² の間に集中しており, 500g/week/m²を超えるものが時々起こっている。前者 は通常の土砂生産,後者は強い降雨時の土砂生産に対 応していると考えられる。生産土砂の粒径などの情報 からも斜面の場の条件が,絶えず変化していることが 推察される。このような場の条件および降雨条件の解 明が重要であるが,非常に困難な課題でもある。

3. 流域における土砂生産特性

3.1 観測地および観測内容の概要

前章では個々の裸地斜面における土砂生産特性につ いて考察したが,この章では Fig.1 に示す高原川流域 内の小流域である流域面積 0.85km² のヒル谷試験流域 における流域全体の土砂生産特性について検討する。 流域全体の土砂生産量は個々の裸地斜面で観測して求 めるのではなく,後述する観測項目から土砂収支を計 算することによって求める。

Fig. 5 はヒル谷流域の平面図を示したものである。 流域の出口には試験堰堤が設けられている。この堰堤 の土砂貯留容量は約 50m³で,年に1,2回満砂し,試 験堰堤が土砂で一杯になると排砂が実行されている。 試験堰堤の約 800m上流で,本川に支川が合流する。こ の支川の源頭部には花崗斑岩の崩壊地があり,この流 域の主な土砂生産源となっている。他にもいくつかの 裸地からも土砂が生産されるが,合流点から本川上流 には土砂生産源がなく,ほとんど土砂移動がない。ヒ ル谷はステップ・プール構造を呈しており,生産され た土砂はプールに堆積しながら徐々に試験堰堤に到達 する。通常はその年生産された土砂はその年の内に試 験堰堤まで運ばれるが,降雨が少ない年では,河道に 堆積したまま翌年を迎えることもある。

このような渓流で以下のような項目についてのデー タが 1970 年頃から蓄積されている。ただし,いくつか の項目については欠測期間もある。

試験堰堤の堆積土砂量 試験堰堤から合流点までの区間の階段状河床の プールにおける堆積土砂量 源頭部裸地の春先における土砂生産量 流域の3箇所の雨量 試験堰堤における流量

は基本的に排砂前後,および顕著な土砂堆積が起 こった直後に堆積形状を測量することにより求めてい る。 は融雪出水,梅雨による出水,台風による出水 の後,年に2回程度測量されている。合流点から源頭 部までの堆積量はほとんど測られていない。 は支川 源頭部における凍結融解作用による土砂生産量にあた る。なお,流出土砂量に関しては1966年,プール堆砂



Fig.3 Grain size distribution of yielded sediment



Fig.4 Relation between sediment production volume and annual rainfall

量については 1973 年から現在にいたるデータがある が,今回解析の対象としたのは 1980 年から 1996 年ま でのものである。

Fig. 6 は試験堰堤から合流点までの区間のプールに 堆積した土砂量と 1980 年からの試験堰堤の積算堆積 土砂量の時間変化を示したものである。図中の描点は 測定値を表す。測定は前述のように主な土砂移動現象 の後に行われている。また,試験堰堤への土砂堆積や 河道内の土砂移動は降雨イベント時に進行することを 考慮して,降雨データ,流量データを参考にすると, これらの連続的な時間変化はFig.6の実線または点線 に示すように階段状になる。

試験堰堤への積算堆積量を見ると,1980年から1996年の間に1983年と1989年の2回急激な上昇があるが,その他はほぼ同じ割合で積算量が増加している。ほぼ一定の割合で土砂が流入するような通常の状態に,2回急激な土砂堆積が見られる。プールの堆積量も毎年大きく変化している。

3.2 土砂生産量の算出

ある期間内の土砂生産量を V_s ,流域からの流出土砂 量を V_a ,河床堆積土砂量の変化量を S とするとこれら の間には以下の関係式が成り立つ。

$$V_s - S = V_d \tag{1}$$

したがって,流出土砂量および河床堆積量の連続的 なデータがあれば,V_Sが求められ,ある期間内の土砂 生産量が推定できる。裸地の土壌の凍結融解が冬季から春季に起こることを考えると,対象期間を冬季から 春季までとそれ以外に取れば,凍結融解作用による生 産土砂量と降雨による生産土砂量をおよそ分離するこ とができるものと考えられる。

ヒル谷流域では,流出土砂量は試験堰堤への土砂堆 積量で求めることができるが,河道堆積量については, 試験堰堤から合流点までのプール内の堆積量のデータ しかなく,このような解析に資するデータがない。し かし,得られたデータを最大限活用して解析を行うこ とにする。

まず, V_d は前述したように試験堰堤への期間内堆積 量を用いる。つぎに, No.0~32 プールの堆積土砂量の 時間変化は Fig.6 のようであるが, これはプール内の 堆積土砂量であり,河道の堆積土砂量ではない。そこ で,河床堆積量はプール堆砂量の1~3倍と仮定する。 また,プールの堆積量は試験堰堤から合流点までしか ない。源頭部で生産された土砂がプールの堆積土砂量 調査時点で合流点の下流まで到達しておれば問題はな いが,合流点の上流にある場合は問題である。これに



Fig. 5 Plan view of the observation reach



Fig. 6 Time variation of sediment volume in pools and accumulated sediment volume in the experimental dam

ついては,プールの堆積量の縦断分布がわかるので, この縦断分布の時間変化の傾向を見ながら,源頭部の 生産土砂量の取り扱い方を後述のように行う。

さて,凍結融解作用による土砂生産は冬季から春季 にかけて起こり,降雨による土砂生産は梅雨期から秋 季にかけて起こる。したがって,それぞれの期間につ いて S と V_dを与えると,凍結融解による土砂生産量 V_fおよび降雨による土砂生産量 V_rを推定することがで きる。しかし,データの不完全さとデータ自身の不確 かさがあるので,ここでは,以下の3つの場合につい て検討する。

(a) Case 1

1年間(1月1日~12月31日)の土砂収支より全生 産土砂量 V_s+V_dを算出する。凍結融解による生産土砂 量は,源頭部おける春季の土砂生産量 v と残りの裸地 から生産量の和であるが,ここでは V_f=v と仮定する。 (b) Case 2a

10月1日から5月31日までを期間 ,6月1~9月 30日までを期間 とし,各期間の土砂生産量を求め, それぞれを V_f, V_rとする。

(c) Case 2b

Case 2a と同様であるが,河道堆積土砂量のとり方を 少し変える。すなわち,期間 では,源頭部裸地から 生産された土砂の大部分が合流点より上流に残留して いることがあるが,合流点より上流に土砂が残留して いるか否かはプールの堆積土砂量の縦断分布からおお よそ推定できる。このケースはそのことを考慮して河 道堆積量の値を補正する。

Fig. 7 に各 Case についての凍結融解と降雨による生 産土砂量の年変化を示す。Max と Min は河道内堆積土 砂量をプール内堆積土砂量の1から3倍としているた め、生産土砂量の算定に幅が生じるためである。また, 各 Case により年度が異なるのは、各データの測定年度 のばらつきによるものである

流域全体の凍結融解作用による生産土砂量は,源頭 部における観測値より大きくなるはずであるが,Case 2a では必ずしもそうなっていない。これは,前述した ように,ヒル谷支川合流点より上流の河道内堆積土砂 量が観測されていないことが最も影響している。それ を補正したCase 2b では,そのことがかなり改善され ている。

3.3 各種要因との相関

凍結融解による土砂生産は凍結融解の回数と正の相 関があると考えられ,降雨による土砂生産は降雨量と 正の相関があると考えられる。そこで,V_f,V_rについ て,凍結融解回数および降雨量との関係について考察 する。降雨量に関しては試験堰堤付近のものを用い,



Fig. 7 Estimation of sediment production

凍結融解回数については,ヒル谷出口よりやや下流部 (源頭部との標高差約 350m)に位置する観測所のも のを用い,凍結融解が 0 を境に気温が上下したとき 起こると仮定して求める。現地での地温データを用い ていないことは問題であるが,ここでは一つの指標と して観測所における気温データを用いる。

(1) 凍結融解回数との関係

Fig. 8 に,1 月から4月までの各月ごとの凍結融解回 数と春季源頭部土砂生産量のデータとの相関を示す。 これによると,凍結融解の最も頻繁に起こる3月の凍 結融解の回数と土砂生産量との間に最もよい相関が見 られる。

(2) 雨量との関係

Fig. 9 (a), (b)に, Case 2b における V, と,期間内の最 大1時間雨量および日最大雨量との関係を示す。これ によると,まず,土砂生産量 30m³/year 以下のグルー プとそれと大きくかけ離れた大きな土砂生産のデータ に分離されることがわかる。前者のグループは時間降 雨量よりも日降雨量との相関が強い。また,後者のデ ータも含めた全データは時間降雨量との相関が強い。



Fig. 8 Relation between V_f and number of freezing and thawing events









Fig. 10 は年間の全生産土砂量と凍結融解の回数との 関係を示したものである。前者のグループは凍結融解 の回数とも相関が高いことがわかる。

以上より 以下のような土砂生産特性が推定できる。 すなわち,通常の降雨・出水に起因する土砂生産は, 雨量に影響をお受けているというより,むしろ凍結融 解作用による不安定土砂の生産に支配されており,降 雨はその生産土砂を運ぶ役目をしている。一方,時間 雨量に起因するような土砂生産はその大きさによって は新規崩壊,崩壊の拡大を引き起こし,通常よりも大 きな土砂生産をもたらす。

4. おわりに

本研究は,個々の裸地斜面の土砂生産および流域に おける土砂動態の長期観測データから、土砂生産の実 態を考察したものである。土砂生産量は一般的に土質 特性,植生の状況,降雨量などをパラメータにして求 めようするのが一般的であるが,本研究の結果,降雨 量との明確な相関はなかった。これは,土砂生産が2

つの様式を持つことに起因するものと考えられる。す なわち,凍結融解作用により裸地斜面表層がある厚さ で不安定になり、それが降水の影響で流出する場合と 強い降雨によって新たな崩壊や裸地の拡大が起こる ような場合である。したがって,通常時,土砂生産量 は凍結融解作用に支配され,大出水時には降雨に支配 されるものと考えられる。

以上のことから,土砂生産の推定にあたっては,凍 結融解作用の結果,重力または通常の降雨により侵食 可能な土砂量の予測が一つのベースになると考えら れる。さらに,新規崩壊または裸地の拡大が起こるよ うな降雨の発生確率を評価した上で,それに伴う土砂 生産量を発生確率に応じて足し合わせるという方法 が考えられる。今後、このような方針で研究を進めて 行きたい。

参考文献

河村三郎(1982):斜面侵食量の一推定法,土木学会第 37 回年次学術講演会概要集,第2号,483-484.

Sediment Production in a Mountainous Watershed - An Observation Research in Takahara River basin-

Masaharu FUJITA, Toyoaki SAWADA, Masao SHIDA and Motohiro ITOH*

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Various phenomena such as turbid flow, sediment transport, riverbed erosion and sediment deposition influences the river environment including eco-system along the sediment movement path. In the integrated sediment management for these phenomena, it is very important to consider the sediment production process as time series of production events. Moreover, it is also important to develop the predicting model of the sediment production. In this research, the characteristic of the sediment production due to the freezing and thawing and the rainfall is examined from the data analysis of the sediment production volume observed in the Takahara river basin. As a result, the sediment production volume is strongly dependent on the number of freezing and thawing events.

Keywords: sediment production, freezing and thawing, mountain watershed, bare slope, integrated sediment management, sediment runoff