

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、土砂生産にかかわるパラメータが多いこと、外力因子が確率的であること、土砂生産場の条件が季節的に変化するので単なる土砂水文学的手法では普遍的な土砂生産量予測式を提示することが難しいこと、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、流砂系の土砂管理、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。

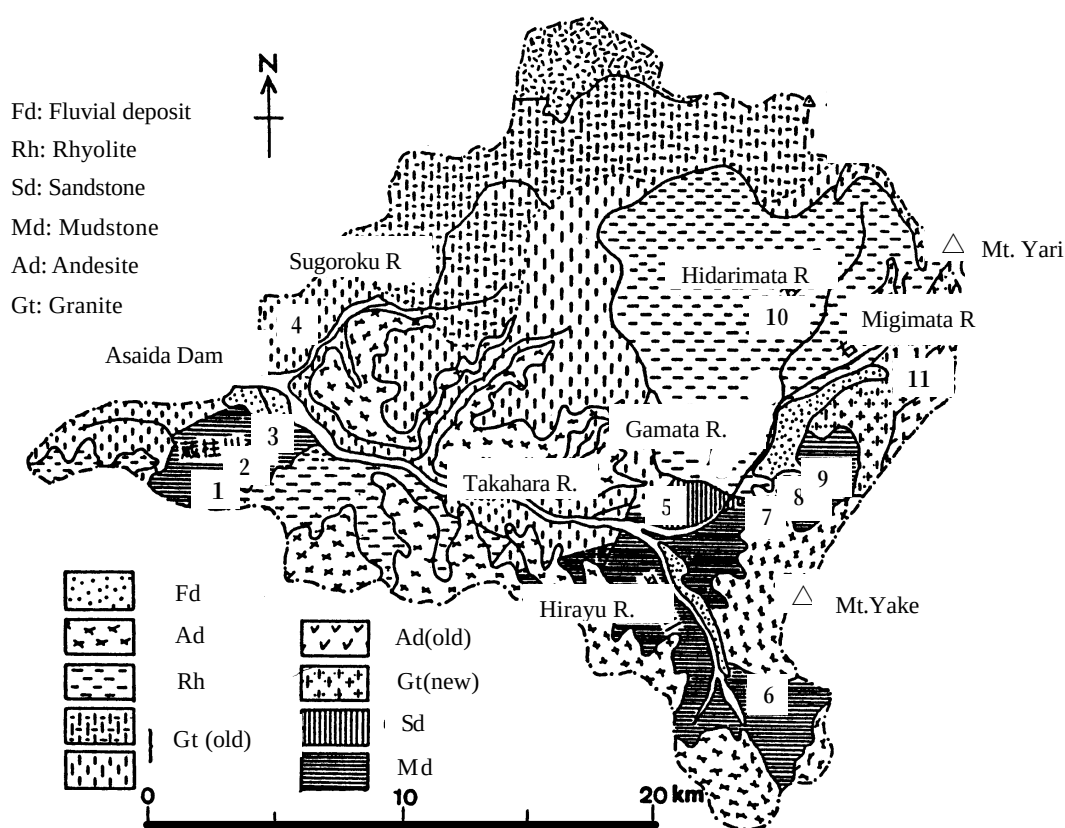


Fig. 1 Locations of the experimental slopes and the geological map

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

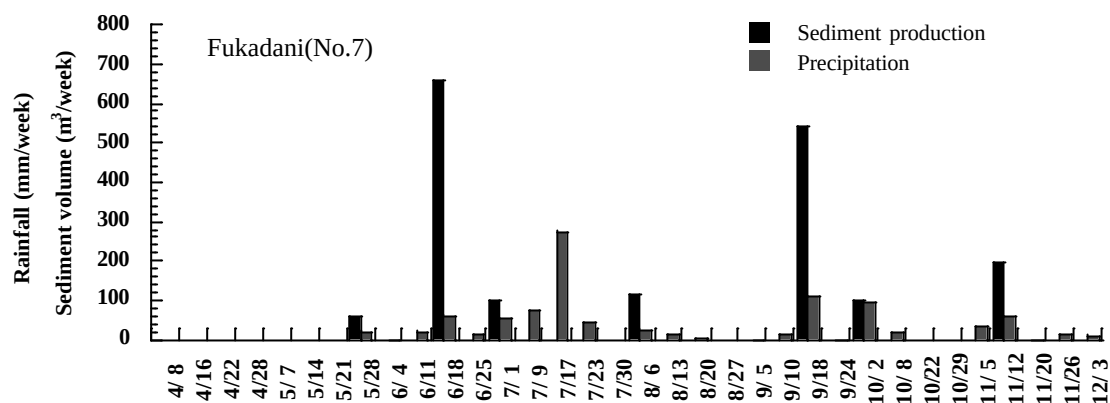


Fig. 2 Time series of sediment production volume and weekly rainfall

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。Table 1 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 50 g 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 650 g 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 100 g 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 30 cm 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 $0\sim 500\text{ g/week/m}^2$ の間に集中しており、 500 g/week/m^2 を超えるものが時々起っている。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 0.85 km^2 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 50 m^3 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 800 m 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。

このような溪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。

- ① 試験堰堤の堆積土砂量
- ② 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
- ③ 源頭部裸地の春先における土砂生産量
- ④ 流域の 3 箇所の雨量
- ⑤ 試験堰堤における流量

①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。②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。③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

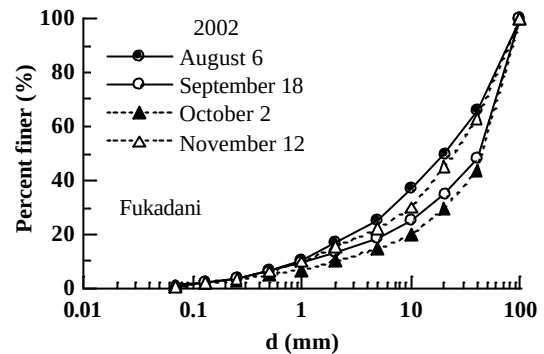
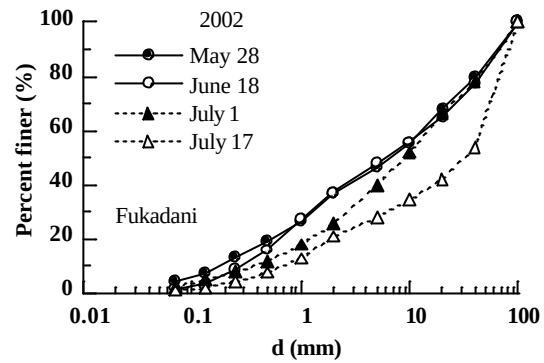


Fig.3 Grain size distribution of yielded sediment

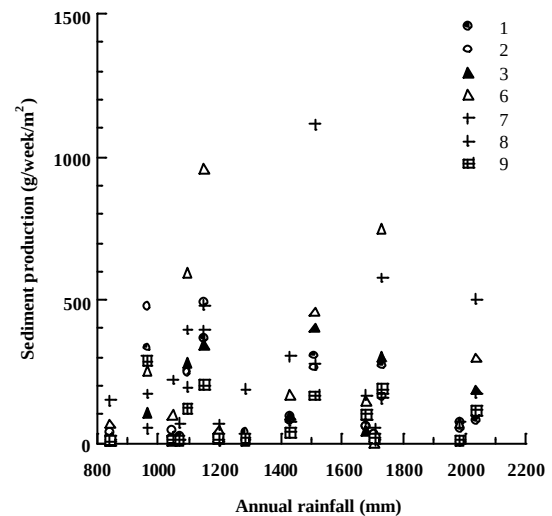


Fig.4 Relation between sediment production volume and annual rainfall

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_d 、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。

$$V_s - S = V_d \quad (1)$$

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

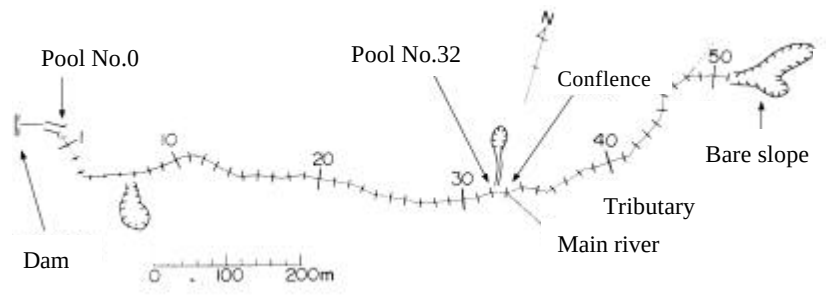


Fig. 5 Plan view of the observation reach

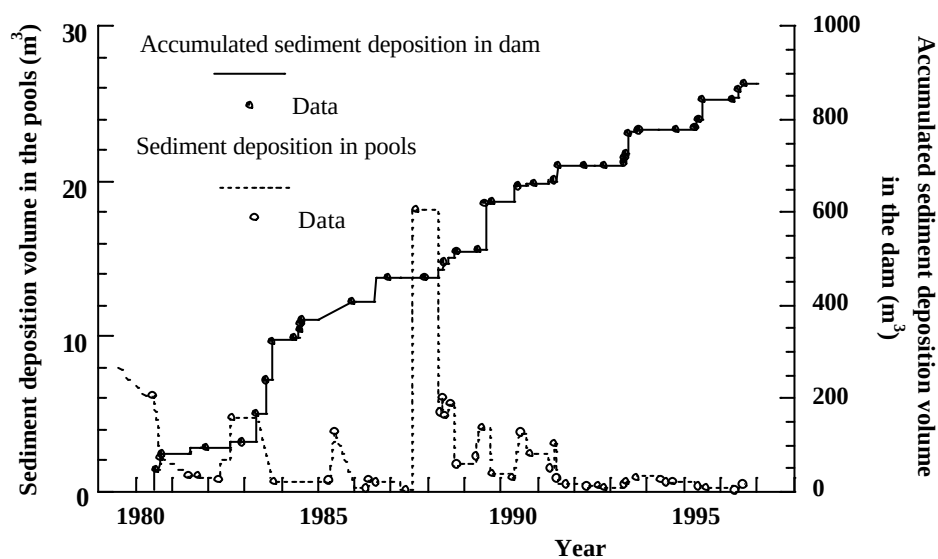


Fig. 6 Time variation of sediment volume in pools and accumulated sediment volume in the experimental dam

については、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、源頭部に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Ⅰ、6月1～9月30日までを期間Ⅱ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Ⅰ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 では必ずしもそうになっていない。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、

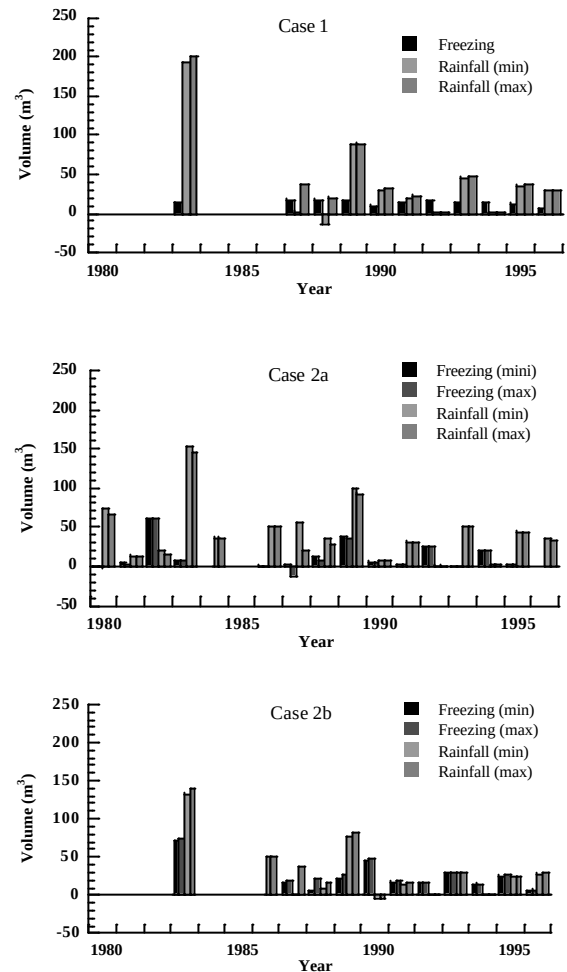


Fig. 7 Estimation of sediment production

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を用い、凍結融解が 0°C 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_r 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 $30\text{m}^3/\text{year}$ 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。

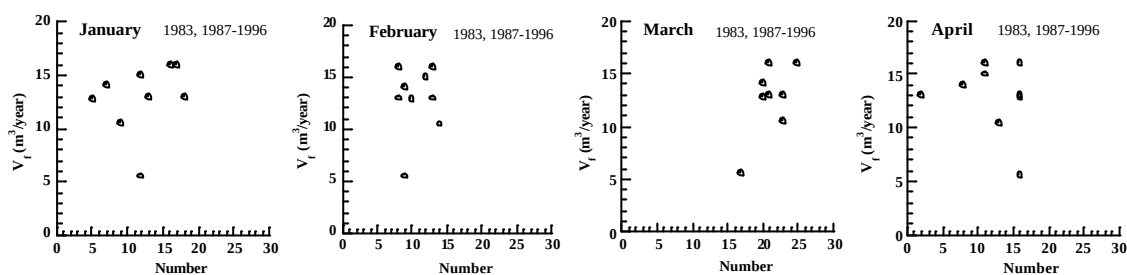


Fig. 8 Relation between V_f and number of freezing and thawing events

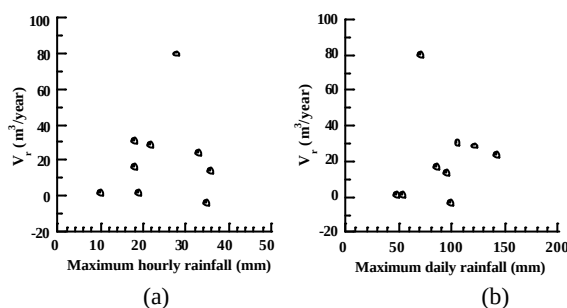


Fig. 9 Relation between sediment production due to rainfall and hourly or daily precipitation

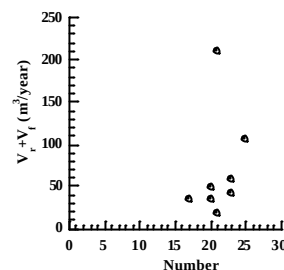


Fig. 10 Relation between annual sediment production volume and the number of freezing and thawing events

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