

裸地斜面における土砂生産
Sediment yield in a bare slope

京都大学防災研究所 澤田 豊明 Toyoaki SAWADA
京都大学防災研究所 芦田 和男 Kazuo ASHIDA

Sediment yield is characterized by many regional factors such as geology, geomorphology, climate and vegetation. The object of this study is to establish a method of surveying sediment yield process in a bare slope, and of analysis and evaluation of the characteristics of the slope. They clarified the characteristics of sediment yield: in particular that the erosion rate is affected by slope gradient, compressive strength of the bare slope, rainfall intensity and the freezing and thawing effect.

Keywords : sediment yield, erosion, landslide, bare slope

1. まえがき

流域の環境変動を予測し、その対策を検討するためには多くの要素に関する的確な情報が必要である。近年河川付近の利用が多様化してきており、流出土砂に関しても量的・質的な情報が求められてきている。流域における土砂生産の量的・質的な予測を的確に行うためには、土砂生産の実態の解明に基づいて斜面の侵食機構とそれに関与する因子を明らかにすることが必要である。流域における土砂生産は、その発生頻度と規模によって二つに大別される。新規の大規模崩壊などが百年単位で発生するのに対して、崩壊などによって裸地となった斜面では降雨などによって小規模な土砂生産が常時発生している。後者の土砂生産は一つの斜面としては土砂生産量は微々たるものであるが、流域内の総量としては大きな役割を演じている。したがって、本研究では裸地斜面における土砂生産の実態の解明を目的として、現地調査・観測を実施してきた。ここでは、現地における数年間の観測・調査によって得られた土砂生産の実態について、条件の異なる斜面における土砂生産について、場の条件や外力の条件について若干の検討を行った。

土砂生産は広義にみると、1)流水による侵食、2)剥離・崩落、3)崩壊および4)土石流などに大別される。ここで研究の対象とするものは1)と2)の一部で、斜面勾配が 10° 以上で斜面長が10m程度の裸地斜面を試験斜面としている。

2. 土砂生産量の測定法と斜面の特性

2-1 研究対象の範囲

土砂生産の形態およびそれに関与する要因は複雑多岐にわたっており、斜面の特性に応じて相違する。そこで試験流域として選定された流域は神通川水系の高原川流域(図1)で種々の裸地斜面が分布し、土砂生産の形態も多種多様である。したがって、条件の異なる斜面の比較研究が有力な手法であり、その際、どの様な方法で何を比較するのか、また、比較の尺度は何であるかを明確にしておく必要がある。そこで、1)単位面積当りの生産土砂量、2)生産土砂量の規模と発生頻度、3)生産土砂の質的な構成などを明確にして土砂生産の特性を検討する。

1)単位面積当りの生産土砂量：この値は土砂生産の程度を比較するために好都合よく、一般的にはダム堆砂資料などを用いて km^2 単位で推定される。これは土砂生産から輸送まで含まれているため、ある程度長期にわたる年平均値として土砂生産の指標として用いることが出来る。しかし、この様な規模では種々の土砂生産の形態が含まれるために地域的な比較は難しい。そこで、ここでは規模の小さな斜面において、 m^2 単位で生産土砂量を比較検討する。

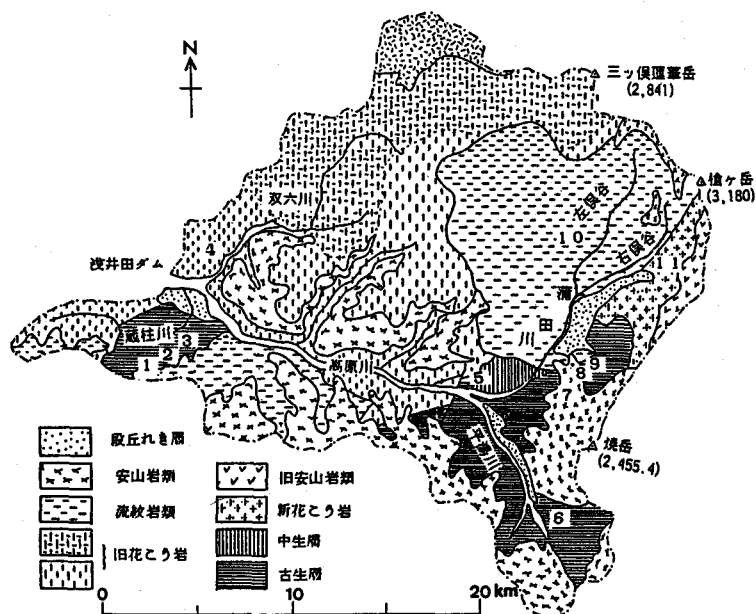


図1 試験流域の地質と試験地の配置（図中の番号）

表1 土砂採集箱による各試験地（図1に番号で示す）の特性

番号	地質	圧縮強度 kg/cm ²	斜面勾配 degree	土砂生産量				
				'85年14週 kg/m ²	'86年34週 kg/m ²	'87年34週 kg/m ²	'88年35週 kg/m ²	'89年35週 kg/m ²
1	流紋岩	5.0	52	3.80	8.67	12.48	10.78	2.86
2	流紋岩	10.5	54	2.25	8.43	16.69	8.99	3.36
3	流紋岩	3.3	50	4.25	9.54	11.73	13.01	5.83
4	花崗岩	1.2	43	15.60	41.03	35.56	-	-
5	古生層	4.3	50	1.15	4.96	7.04	5.28	-
6	古生層	3.8	60	10.50	20.17	32.61	19.41	-
7	火砕流堆積	0.9	55	8.10	13.51	16.49	22.27	48.65
8	流紋岩	0.6	42	2.20	6.68	13.43	9.77	6.05
9	流紋岩	0.5	35	2.65	4.16	6.90	6.47	3.96
10	流紋岩	2.0	50	2.05	6.38	-	5.11	-
11	流紋岩	2.8	48	2.65	11.02	-	10.07	-

2)生産土砂量の規模と発生頻度：生産土砂量の規模は大きく変動し、その変動が大きい現象ほど発生頻度は小さい。ここで対象としている斜面長は5mから20mであって比較的小規模である。したがって、降雨や凍上・融解などに支配され、生産土砂量は少ないが発生頻度は比較的大きい傾向にあるため、その測定期間の間隔は1週間から一年間としている。

3)生産土砂の質的な構成：生産土砂の粒径分布は土砂の流出形態や流出過程を支配する要素として重要な役割を演じている。また、土砂生産の形態によって粒径分布が支配されるので、粒径分布からその形態を推定することが可能であり、ここでは粒径分布の測定も行っている。

2-2 土砂生産の形態と測定法

土砂生産の形態は対象斜面の勾配によって、便宜上、以下のように三つに大別している。

a)斜面勾配が安息角より緩い場合

侵食深はクイ（鉄棒）の露出長の変化量から求めている。対象斜面は火山噴出物の未固結堆積物から構成されており、クイは容易に地中に挿入することができる。クイの露出長は春（6月）と秋（10月）に測定されている。各クイは斜面長が1mとなる地点に設置されている。斜面表層の約2cmは春の時点では霜柱の影響で非常に空疎になっているが、秋の時点ではその様な部分は認められず季節的に変動している。この斜面の堆積物の粒径分布は巨れきも含まれるが1mm以下の微細なものも多い。

b)斜面勾配が安息角より急な場合

このような斜面の多くは堆積物が少なく、表面は基岩とその風化物によって構成されており、斜面にクイを打ち込むことは容易ではない。したがって、クイによる方法では測定が困難であり、それに代わる方法として土砂生産量の測定は斜面の下部に土砂採集箱を設置し、1週間毎に箱に入った土砂を採集して重量と粒径分布を測定する方法を採用した。測定地点は11ヶ所で斜面勾配、地質、および斜面表層の圧縮強度は表1に示すとおりである。

c)斜面勾配が垂直に近い場合

斜面勾配が急な崖やガリ壁面などの侵食量は直接測定が困難である。そのため斜面下部の堆積土砂量から間接的に生産土砂量を求めている。一方、堆積土砂が頻繁に侵食される溪岸の斜面では光波測距儀による直接測定が必要である。この方法は反射鏡を測定対象斜面に設置しなければならなかったが、近年、測定距離が300m以下であれば反射鏡を必要としないものが開発され、ガリ壁面などの危険斜面の測定が容易になった。調査を実施してきた斜面は火山噴出物の堆積面を侵食して形成されたガリ壁面である。その高さは5mから30mである。壁面を構成しているものは安山岩質の火山灰・砂れきで、直径1m程度のれきも多く含まれており、その粒径分布は広い範囲に及んでいる。これらの堆積物の固結の程度は弱く、粘着性もなく水流に対する侵食抵抗は小さい。

3. 土砂生産の特性

3-1 斜面勾配が安息角より緩い場合

斜面勾配が安息角より緩い場合、斜面における土砂の移動を引き起こすものとして、表面流、雨滴、霜柱、風などがある。観測・調査を実施している斜面は水みちなどが形成されていないこと、斜面長が1mに設定されているために降雨時に表面流の発生がないものとする。この斜面を構成する土砂の粒径分布は火山灰から直径30—50cmの広い範囲におよんでおり、その大半は1cm以下の細粒成分が占めている。

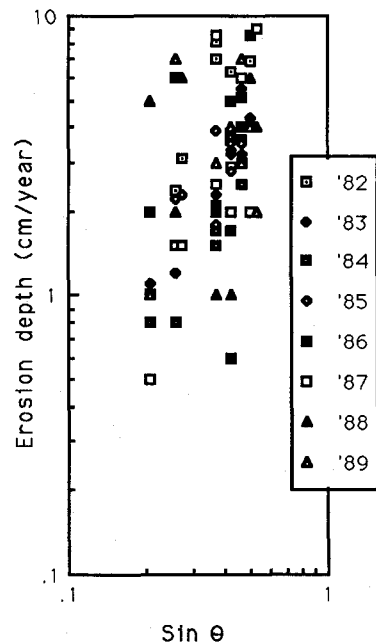


図2 安息角以下の斜面における侵食量と斜面勾配の関係

この斜面における測定結果は図2に示すとおりである。この図において、縦軸は斜面の侵食深 (cm/年)、横軸は斜面勾配 θ を $\sin$ で示している。この図には1982年からの資料が示されているが、斜面勾配に比例して侵食深 E は大きくなる傾向が認められる。これらの関係は一般的な形として、

$$E = a \sin^3 \theta \quad (\text{cm / year}) \dots \dots (1)$$

のように表すことが出来る。ここに、 a の値は地域性や外力に支配されるものと考えられることから、この値を求めることが出来れば侵食深の推定が可能となる。このように斜面長が1 mで表面流の発生が少ないと考えられる場所で侵食深が斜面勾配に支配されていることは、次のように考えられる。この斜面では積雪のない冬期間において、凍上・融解が発生した場合、直径1 cm程度の小石も霜柱によって持ち上げられ、この霜柱の融解や倒壊によって斜面の下方へ移動する。このような一度の現象による土砂の移動距離は、斜面勾配を θ 、霜柱の高さを h とすれば、霜柱が完全に融けた場合は、 $\tan \theta \cdot h$ で表すことができ、霜柱が壊れずに倒れた場合はその高さ h そのものになる。したがって、これによる侵食は凍上・融解の回数に支配される。その他、雨滴や風による土砂の移動も考えられる。

3-2 斜面勾配が安息角より急な場合

この調査は1985年から継続して行われている。表1にはその結果の一部が示されている。生産土砂量は m^2 当りの重量で週単位の値で示している。まず、場の条件をみるために、土砂生産量と斜面勾配の関係を図3において検討する。この図からも明らかなように、全体的な傾向として斜面勾配が大きくなると土砂生産量が多くなっている。しかし、一部の値がこの傾向から外れているが、これは斜面構成材料の粘着性、凍上・融解の発生条件などの違いによるものと考えられる。つぎに、土砂生産量と簡易試験による圧縮強度との関係についてについて図4に示すような関係が得られた。この図から明らかなように、圧縮強度が大きくなると土砂生産量が減少する傾向とその上限値が認められる。

ついで、土砂生産量と外力の関係について検討する。この地域では土砂生産の外力として降雨および凍上・融解が重要な役割を演じている。まず、凍上・融解についてみると、気温が 0°C を境に上下する3月および4月に土砂生産量が多いが、降雨量との関係は明瞭ではない。これは凍上・融解に起因するものと考えられる。

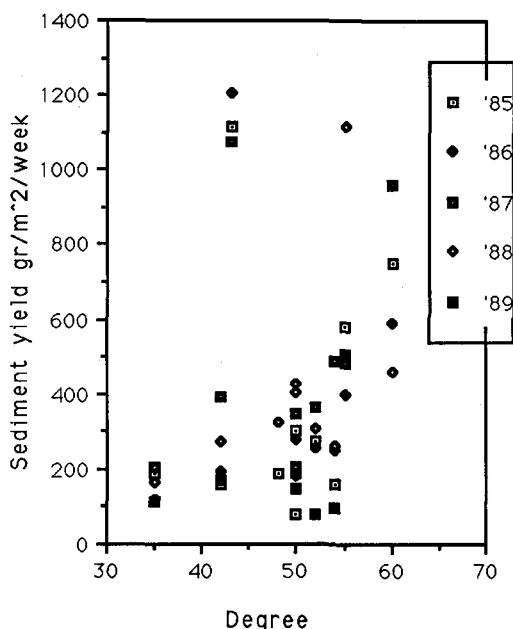


図3 土砂生産量と斜面勾配の関係

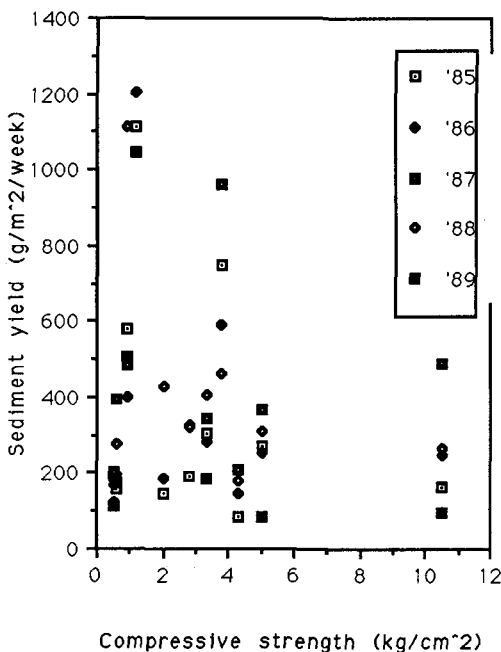


図4 圧縮強度と土砂生産量の関係

この時期の多量の土砂生産は凍上・融解によって斜面から土砂が離脱・落下することによるものと考えられる。一方、生産された土砂の粒径についてみると凍上・融解期のものが大きく、降雨期のものは比較的細粒径のものが多く、この様な理由として、凍上・融解で斜面から離脱したものは、その粒径が大きいほど途中の斜面で停止しないのに対して、粒径が数mm以下のものは斜面の途中で停止し、その後の雨適や斜面上の薄い流れで再移動することが考えられる。そこで、土砂生産と降雨の時間分布を図5でみると履歴的な特性が認められる。この図において、土砂生産の全体的な傾向をみると5月から徐々に土砂生産量が減少するものと、降雨に対応して生産土砂量が増加するものが含まれている。前者には一年を周期とする傾向が認められる。さらに、後者の降雨量と土砂生産量の関係においても時間の経過と共に土砂生産量が減少する傾向が認められる。以上のような特性は凍上・融解によって移動しやすくなった土砂が減少したことによるものと考えられる。このように斜面の状態は常に変化しているので、同一の斜面条件ではないので厳密さを欠くが凍結・融解の時期を除けば、総雨量と土砂生産量の関係は比較的に良い傾向を示している。しかし、降雨時にこの様な斜面において、雨水がどのような挙動を示しているか明瞭ではないが、これらの斜面には水みちやリルの形成は認められない。そこで、生産土砂の粒径分布と降雨の関係を図5および6において検討してみよう。図6は図5の土砂生産の多いものについて粒径分布を示したものである。4月5日と5月2日のものは雨量が少なくにも拘らず土砂量が多く、その粒径分布も大きくなっている。これは凍結・融解による土砂生産の特徴である。これに対して9月6日および20日のものは雨量が多いにも拘らず土砂量はそれほど多くなく、その粒径も小さいことが特徴である。これは降雨時に斜面上の細粒成分を洗い出すような薄い流れが存在することを示すものと考えられる。また、降雨量や降雨強度が小さく、その様な流れが発生しない場合でも雨水の浸透によって粒子間の結合力が低下し、砂粒子が斜面を落下するものと考えられる。その際、斜面の凹凸に比較して大きな粒子ほど途中の斜面に停止せず落下するものと考えられる。その他、定量的な評価は困難であるが、風による侵食や日射による地表の膨張による剥離なども認められる。

3-3 ガリ壁面の侵食

ガリの発達には火山堆積層の分布地域に多く、流域における土砂供給源として重要な役割を演じている。この調査地域では焼岳火山の堆積層を侵食して形成されたガリにおいて、その壁面から生産された土砂が土石流の材料となっている。したがって、この土砂生産は土石流の発生を大きく支配している。このガリ壁面の形状は図8に示すように、垂直に近い壁面と安息角の堆積面からなっている。土砂の生産はこの壁面に発生している。生産土砂の堆積物が侵食されない場合は、その堆積面上の昇と共にガリ壁面の高さが低くなり、最終的に安息角の堆積面だけになる。しかし、水流や土石流によって堆積物が侵食されることが多く、ガリ

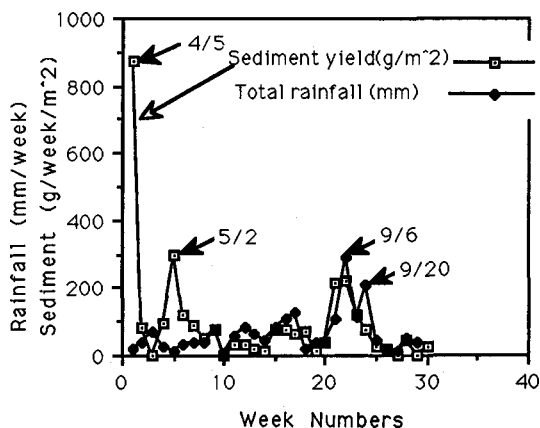


図5 土砂生産の履歴特性(試験地番号1)

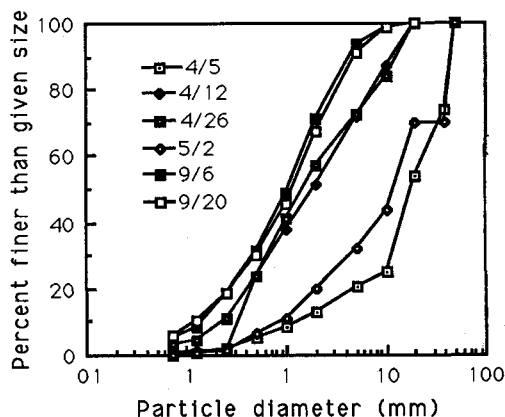


図6 生産土砂の粒径分布の季節変動

壁面は消滅しない。1981年から1988年までのガリ壁面の侵食とガリ壁面の高さの関係は図7に示すとおりである。この図の縦軸は侵食深 (cm/年)、横軸はガリ壁面の高さ (m) である。各年によって若干異なるが、全体的な傾向として、それらには比例の関係が認められる。この斜面では冬期間の凍上・融解と風による微細粒子の侵食が顕著であり、降雨による侵食は少ない。

侵食量がガリ壁面の高さに比例していることの理由として、ガリ壁面の微細粒子が凍上・融解および風などによって離脱を繰り返し、それによって大きなれきが壁面から露出する。れきの露出部分が大きくなって落下する際、それが途中の壁面に衝突して壁面を侵食するので、その壁面が高いほどその機会も多くなることが考えられる。このような特性はガリ壁面を構成する材料の粒径分布が広い範囲に及ぶことに起因しており、均一粒径に近い斜面ではこのような傾向は認められない。

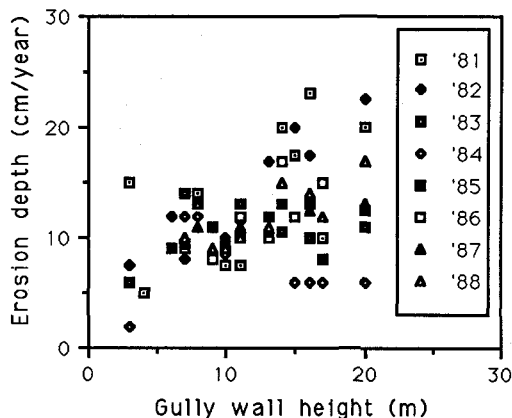


図7 ガリ壁面の侵食深と壁面の高さの関係

3-4 土砂生産の予測と侵食の防止

流域における土砂生産を予測することは、それに関与する要素が多く、特に新規の崩壊などによる土砂生産の予測は困難である。ここでは崩壊などによって形成された裸地斜面を対象に、その実態を明らかにした。その結果、裸地斜面は土砂生産源として重要な役割を演じており、その斜面の面積と勾配および斜面構成材料の特性から土砂生産量の概略を推定することも可能である。さらに、詳細な予測が必要な場合、対象流域に設置された試験地の2・3年の観測結果が有効な手段となる。

一方、裸地斜面の侵食防止は安息角以下の斜面に対しては種々の工法が提案されているので、その斜面の特性や防止の目的に応じて採用すれば良いが、ガリ壁面の様に垂直で未固結の堆積物の場合、その対策は容易ではない。現在、予備試験的に行っている工法は、ガリ壁面に凍結・融解が発生しないようにする方法である。その他、ガリ壁面を分割してガリの高さを低くする方法が施工され、その効果が認められている。

4. まとめ

土砂生産を予測することは、その発生に関与する要素が非常に多く、これらがこの研究の障害となっている。本研究は土砂生産を斜面勾配によって分け、試験地を設けて観測・調査により土砂生産の実態を明らかにした点に特徴を有する。以下、斜面勾配によって分けられた形態ごとに成果をまとめる。

- (1) 斜面勾配が安息角より緩い場合：斜面勾配を θ とすると、侵食深 E (cm/年) は $E = a \sin^2 \theta$ のように表すことができる。なお、 a の値は地質条件や気象条件に支配され地域性を有するものと考ええる。
- (2) 斜面勾配が安息角より急な場合：侵食量に対して凍上・融解、降雨量および斜面勾配が支配的な要因となっている。
- (3) 斜面勾配が垂直に近い場合：斜面構成材料の粒径分布が広く、粘着性のない土砂で構成されているガリ壁面などでは、侵食深が斜面の高さに比例する。

参考文献

- 1) 芦田和男・高橋 保・沢田豊明：山地流域における出水と土砂流出(15)、京都大学防災研究所年報第29号 B-2, 1986, pp. 291-307.
- 2) 芦田和男・沢田豊明・江頭進治：山地流域における出水と土砂流出(17)、京都大学防災研究所年報第31号 B-2, 1988, pp. 395-409.