

風化花崗岩地帯における崩壊地の表面侵食と USLE によるその解析

小林 由佳¹・北原 曜^{1,*}・小野 裕¹

小林由佳・北原 曜・小野 裕：風化花崗岩地帯における崩壊地の表面侵食と USLE によるその解析 日林誌 86：365~371, 2004 風化花崗岩地帯における崩壊地から発生する表面侵食の実態を把握するため、長野県飯田松川流域の表層崩壊地に土砂受け箱を設け、2 年間にわたり侵食土砂量を測定した。その結果、崩壊地からの侵食土砂量は両年で大きな差はなく 1,200 ton/ha/yr であった。この値は、これまで知られていた値よりやや大きい。侵食土砂量を支配する要因は降雨と凍上融解で、前者による侵食土砂量は 6 割を占めた。凍上融解による侵食土砂量は、年により大きく変動した。降雨による侵食土砂量について、USLE の降雨係数を従来知られている降雨指標と比較検討したところ、いくつかの降雨指標と同等の比較的高い信頼性が得られた。また、この崩壊地について USLE の土壌係数を算出した結果、未熟土の半分程度の値を示した。この土壌係数を用いれば、崩壊地からの降雨による侵食土砂量の推定に USLE は有効であると判断された。

キーワード：表面侵食，風化花崗岩，崩壊地，USLE

Kobayashi, Y., Kitahara, H., and Ono, H.: Surface Erosion from Landslide Site in Weathered Granite Area and the Analysis by Using USLE. J. Jpn. For. Soc. 86: 365~371, 2004 To quantify the amount of surface erosion from landslides in the weathered granite area of central Japan, a soil trap was installed at the base of a landslide site in Matsukawa watershed, Nagano Prefecture for a 2-yr period. The average surface erosion from the landslide site was 1,200 ton/ha/yr with no difference between the two years. This value is a bit larger than previously believed. Both rain and frost heaving had significant influences on the amount of surface erosion; rain produced 59% of total surface erosion. Erosion by frost heaving varied widely between the two years of monitoring. The rainfall factor of USLE and some rainfall indices for surface erosion are estimated with a high confidence level when comparing the rainfall factor with known rainfall indices for surface erosion. The soil erodibility factor used in the USLE calculations is half the value of immature soil. By using this value of soil erodibility, the USLE provides an effective estimate of surface erosion from landslide sites during rainfall periods.

Key words: landslide site, surface erosion, USLE (Universal Soil Loss Equation), weathered granite

I. は じ め に

山地流域全体の土砂収支において注目すべきは、上流域で生産される土砂である。ところが、土砂の生産や流出は、長期的で連続的である場合と不連続で偶発的である場合があり、また、土砂の生産や流出を支配する因子が極めて多くそれらが複雑にからみあっていることから、非常に扱いにくいことが問題である（吉良，1982）。流域からの流出土砂量には、気象災害などにより突発的に大量に発生する崩壊土砂などが大きく影響しているが、川口（1951）は、平時に生じる少量の侵食も連続的に発生し続けると大規模な崩壊に匹敵する土砂量になると述べている。特に崩壊地においては、その侵食土深がおよそ $10^0 \sim 10^1$ mm/yr 程度である（川口，1953）ことから、流域の生産，流出土砂には崩壊地から平時に生じる侵食土砂量も大きく影響していることは間違いない。

崩壊地における侵食土砂量の測定例としては、昭和 26~28 年度にかけて林野庁治山課（1957）が、全国のはげ山や崩壊地などの荒廃地から平時の降雨によって流出する侵食土砂量を測定した調査例がある。この調査では、荒廃地における侵食土砂量については杭を、移動した土砂が

下方の溪流へ流下する流出土砂量については小型の土砂受け箱を用いて測定されている。その結果、荒廃地の侵食土砂量は侵食土深にして 20~40 mm/yr であること、荒廃地下端まで移動する流出土砂量は 10 mm/yr 程度であることが明らかにされている。この試験は、崩壊地を含めた荒廃地で侵食土砂量が測定されたはじめての試みであるが、一般的な傾向をつかむために実施されたため、その精度は低い。その後、山地を対象にした侵食についての現地試験は主に森林の侵食防止機能へと焦点が移り、荒廃地そのもの、特に崩壊地における侵食について降雨などの要因を整理して解析したものはほとんどなく、その特性などは未解明のままである。

このように、崩壊地における侵食土砂量は、測定例とその侵食要因の解析が不十分であり、崩壊地が分布する山地流域全体における土砂収支を推定することは困難である。そこで本研究では、中部山岳地域の風化花崗岩地帯における典型的な表層崩壊地を対象に、侵食土砂量の実態を明らかにすることと、その要因の解析を行うために侵食性要因のみならず受食性要因までも評価できる USLE の適用の可否を検討することを目的とした。解析に用いた USLE は、農地での利用を前提に作成されたモデルであるが、近

* 連絡・別刷請求先（Corresponding author） E-mail: hkita@gipmc.shinshu-u.ac.jp

¹ 信州大学農学部（399-4598 長野県上伊那郡南箕輪村 8304）

Faculty of Agriculture, Shinshu University, 8304 Minamiminowamura, Nagano 399-4598, Japan.
（2003 年 12 月 3 日受付；2004 年 10 月 1 日受理）

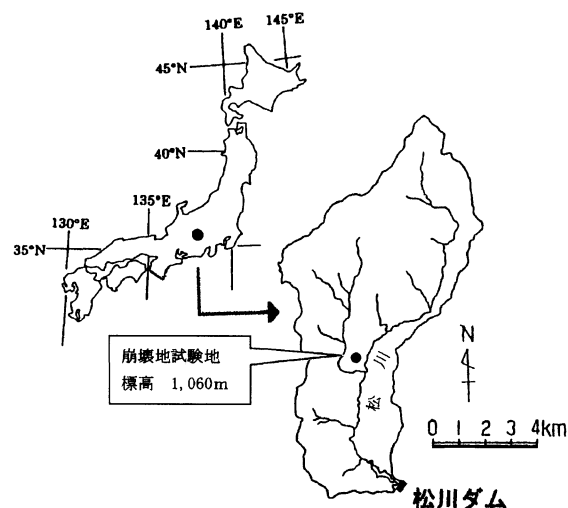


図-1. 試験地の位置
Location of the experimental area.

年, 北原 (2002) などにより山地森林地帯でも適用できるように改善されてきた。しかし, これまで崩壊地を対象としたこのモデルの適用例はない。今後, 山地流域全体における土砂収支を定量的に把握するためにも, 降雨, 地形, 土壌, 植被など六つの要因が反映される USLE の崩壊地適用の可否を検討することは必要不可欠である。

II. 対象地と測定方法

1. 崩壊地試験地

試験地は, 長野県南部飯田市の松川ダム上流域 60 km² のほぼ中央に位置し, 標高 1,060 m 地点に発生していた表層崩壊地とした (図-1)。松川ダムはその上流域に表層崩壊地が多く, 流出土砂による堆砂問題が深刻なダムである。松川ダム (標高 689.3 m) 観測所の気象概況は, 年平均降水量 1,989.7 mm (観測期間 1975~2000 年) で, 年平均降水日数 137 日である。この地域は夏季多雨の特性をもち, 冬期には降雪となる。また, 飯田測候所 (標高 482.3 m) の記録では, 降雪初日の平年値は 11 月 30 日, 終日の平年値は 3 月 30 日である。ただし, 本試験地は飯田測候所よりも標高が約 580 m 高いため, 積雪量はより多く降雪期間はより長いと考えられる。

侵食試験地を設定した崩壊地の大きさは, 斜面長が 42.5 m (水平投影長が 32.2 m), 崩壊地下端の幅が 11.4 m で, 水平投影面積は 247.6 m² である。崩壊地の平均傾斜は 41° で, 斜面方位はほぼ西向きである。地質は伊奈川花崗岩 (粗粒角閃石黒雲母花崗岩) を基盤としているが, その風化はすすんでおり地表面はマサ土化している。なおこの崩壊は, 崩壊土塊上の立木の状況などから 1997 年頃に発生したものと推定される。

試験は, 崩壊地より発生した侵食土砂を下端で全て捕捉し質量を測定する方法とした。まず, 崩壊地下部にある崖錐上端に, 長さが 11 m, 深さが 30~50 cm, 幅が 45~80

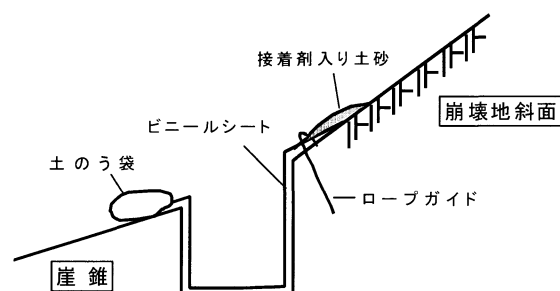


図-2. 土砂受け箱の概要
Sketch of the soil trap installation at the landslide site.

cm の溝を等高線方向に掘り, この溝にビニールシートを敷き土砂受け箱とした (図-2)。ビニールシートと崩壊地表面との接合部は, ロープガイドでビニールシートを固定した上で, 木工用ボンドに現地土砂を混ぜペースト状にしたものを塗り固めた。このようにするとボンドに混ぜた土砂が地表面とともに接着固結し, 崩壊地斜面から流下してきた侵食土砂が土砂受け箱に完全に捕捉される。土砂受け箱底面には等高線方向に弱い高低差を設け, 最低部には 1 mm メッシュの金網を取り付け排水口とした。土砂受け箱は雨滴が箱内に飛び込んでも土砂をはねあげない深さのため, ふたはつけなかった。

測定期間は, 2001 年 7 月 24 日から 2003 年 7 月 29 日までの約 2 年間で, 測定年の区切りを, 2001 年 7 月 24 日から 2002 年 7 月 24 日までを 1 年目, 2002 年 7 月 25 日から 2003 年 7 月 29 日までを 2 年目とした。侵食土砂量の回収は, 約 1 カ月に一度の頻度で行った。侵食土砂量の回収と測定方法は次のようにした。まず土砂受け箱に堆積した土砂をポリバケツに入れ, ばねばかりで質量を測定した。こうして土砂受け箱に堆積していた全ての土砂の質量を測定するとともに, 土砂の一部を持ち帰って絶乾させた。なお, 土砂受け箱に堆積した土砂は水分状態や粒径などに偏りがあるため, 土砂受け箱各所から平均的に採取した。採取した土砂の乾燥は 100°C 以上で 48 時間以上かけて行い, その後絶乾質量を測定した。測定期間の侵食土砂量は, 採取時の全土砂質量を絶乾質量に換算して求めた。また, 侵食土砂量を侵食土深に換算するため, 崩壊地の地表面より 400 mL 採土円筒を用いて採土し, 原土の容積重を求めた。なお, 冬期は土砂受け箱が積雪に覆われ土砂の測定ができなかったため, 11 月下旬以降に堆積した土砂については融雪後の 4 月にまとめて測定した。

降雨量については, 試験地に隣接して転倒マス式雨量計を設置し 10 分間隔で観測した。なお, 設置した雨量計にはヒーターがついていないため, 降雪期である 12 月から 3 月の降水量は雨量計の集水口上の積雪が融けた際の水量である。

2. ヒノキ人工林試験地

崩壊地の侵食土砂量と比較するために, 隣接するヒノキ人工林内に侵食試験地を設置し, 崩壊地と同様に侵食土砂

量を測定した。この試験地は、崩壊地試験地とは同一斜面で約 10 m 離れた位置にある。ヒノキ人工林は、平均胸高直径 11.9 cm, 平均樹高 9.0 m, 立木密度 2,000 本/ha の 20 年生である。当初、侵食試験地内には 7 本のヒノキが存在していたが、2002 年 12 月から翌 3 月までに間伐が行われ 6 本となった。この間伐による地表攪乱はなかった。林床植生はササ (桿高 70 cm), スゲ, ムラサキシキブ, ヤマブキ, クロモジが散生している。試験地内の下層植生の植被率は 15% 程度, リター被覆率は 85% 程度である。

この侵食試験地は、斜面長が 7.6 m (水平投影長は 5.5 m), 幅が 3.8 m で斜面上部の 1 辺と斜面方向の 2 辺を木の板で囲んだ。水平投影面積は 20.1 m², 傾斜は 44° である。試験地下端の等高線方向に、長さが 3.8 m, 深さが 30 cm の溝をつけ、崩壊地と同様の構造をもつ土砂受け箱を設置した。採取した土砂の測定手順は前述した方法と同じであるが、ヒノキ人工林の場合はリターなどの有機物が多く混入するので、目視で有機物を分別して取り除いたものを侵食土砂量とした。

III. USLE の崩壊地適用

1. USLE の各係数算出方法

USLE は土壤の侵食に関わる六つの因子の積で表される。

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

ここで、 A : 年侵食土砂量 (ton/ha/yr), R : 降雨係数 (m²・tonf/ha/h), K : 土壤係数 (ton・h/m²/tonf), L : 斜面長係数, S : 傾斜係数, C : 作物係数, P : 保全係数である。

1) 降雨係数 R

ここでは、わが国でよく用いられている 60 分間降雨強度による R の簡便計算法 (細山田・藤原, 1984; 大倉ら, 1998 a) を用いて測定期間約 1 カ月ごとに算出した。すなわち、まず測定期間内の時間雨量表から R の条件に基づいた一連続降雨を選び出し、各一連続降雨について R を算出し、次いで測定期間内で積算して求めた。

2) 土壤係数 K

K は土壤の受食性を示す係数で、谷山 (1998) の土壤型別の値を示した表があるほか、年侵食土砂量 A が得られれば、裸地では $C=1$, $P=1$ であるため逆算して $K = A / (R \cdot L \cdot S)$ で求めることができる。崩壊地についても、植生がなく山腹工などの人為的保全工事もされていないので裸地と同様な方法で K を求めた。すなわち、本崩壊地試験地で実測された A を R , L , S で除して $K = 0.105$ を得た。

3) 斜面長係数 L , 傾斜係数 S

L , S はそれぞれの算出式から求められる。ここでは、崩壊斜面長が 42.5 m であるので $L=1.39$, 崩壊地の平均傾斜が 41° であるので $S=30.9$ が算出された。

4) 作物係数 C , 保全係数 P

近年、両係数について山地森林における適用例がみられる。大倉ら (1996) が傾斜 30° までの急斜面での適用性を、大倉ら (1998 b) が植生の復元過程を作物係数 C の経年変化で表すことを、北原 (2002) がこれまでわが国で行われた精密な野外侵食試験の資料から多数の C と P を算出している。前述したように崩壊地では植生がなく、保全工事等もされていないので $C=1$, $P=1$ とした。

2. 降雨指標の算出方法

USLE の崩壊地における適用性の可否を検討するために、USLE の降雨係数 R と他の降雨指標を比較する。土壤侵食には降雨量よりも降雨強度が大きく影響することが知られており、降雨指標としてこれまでに、大味・綱本 (1967) による降雨加速指数、服部ら (1989) による 10 分間最大降雨強度などがある。しかし、これらの降雨指標の検討は森林や裸地を対象としたものが多く、急傾斜の崩壊地において検討された例はない。そこで、崩壊地に隣接した場所で観測した降雨データをもとに、USLE の降雨係数 R のほかに測定期間ごとの降雨量の積算値、10 分間最大降雨量の積算値、60 分間最大降雨量の積算値、降雨加速指数を算出し、これらの五つの降雨指標と各試験地で測定した侵食土砂量との関係を調べた。なお、侵食土砂量に対する純粋な降雨の影響のみを調べるために、11 月下旬から 3 月までの降雪とみられる降水と侵食土砂量は検討から除外した。

10 分間、60 分間最大降雨量の算出には、服部ら (1989) の方法を参考にした。服部らは、10 分、30 分、60 分の最大降雨強度を求める際の一連続降雨を、降雨が 5 mm 以上連続しており、一つの降雨と次の降雨の間が 5 時間以内であるものと定義している。本研究では侵食土砂の測定が約 1 カ月に一度であるため、以下のように降雨指標を算出した。まず、測定期間中に発生した降雨のうち、服部らが定義した一連続降雨全てを選択し、各一連続降雨の 10 分間最大降雨量と 60 分間最大降雨量を抽出する。次いで、それぞれを測定期間のなかで積算したものを、10 分間最大降雨量の積算値、60 分間最大降雨量の積算値とした。

降雨加速指数は大味・綱本 (1967) により開発された、侵食土砂量と降雨の関係を示す指数である。この指数は、降雨量を Pr , 降雨強度として 60 分間最大降雨量を I , 瞬間的降雨強度として 10 分間最大降雨量を i とし以下の基本式で表される。

$$E = a (Pr \cdot I \cdot i)^b$$

ここで、 E は侵食土砂量 (g), Pr は期間降雨量 (mm), I は 60 分間最大降雨量 (mm), i は 10 分間最大降雨量 (mm), a および b は係数である。 $Pr \cdot I \cdot i$ はヒノキ林や裸地において侵食土砂量と高い相関があることが報告されている。本研究では、侵食土砂量の測定期間内で区切った 1 カ月ごとの降雨量の積算値と、前述の服部ら (1989) の方法で算出した 10 分間最大降雨量の積算値、60

分間最大降雨量の積算値の相乗積を用いて降雨加速指数を算出した。

IV. 結 果

崩壊地およびヒノキ人工林試験地における侵食土砂量、降水量観測結果、また観測した降雨量より算出した各降雨指標を表-1に示す。

1. 崩壊地侵食土砂量

表-1に示したように、崩壊地の年侵食土砂量は1年目が1,392.9 ton/ha/yr, 2年目が1,006.0 ton/ha/yrであった。年による差は比較的小さかったので平均すると、約1,200 ton/ha/yrであった。採取した崩壊地原土の容積重は1.40 g/cm³であったので、以上の年侵食土砂量を体積換算すると、1年目は993.5 m³/ha/yr, 2年目が717.6 m³/ha/yrであった。また年侵食土深であらわすと、それぞれ99.4 mm/yr, 71.8 mm/yrであった。

図-3に測定期間別の侵食土砂量を示す。図示のように、崩壊地からの侵食土砂量は、夏期6～8月と冬期12～3月に多かった。12～3月の侵食土砂量は1年目と2年目で大きく異なり、1年目では865.4 ton/ha（年侵食土砂量の62%）、2年目では208.4 ton/ha（同21%）であった。

次に降雨が侵食に及ぼす影響について、各測定期間の降雨指標と侵食土砂量の関係を表-2に示す。表には降雪期の12～3月を除いた各測定期間の降雨指標を x 、侵食土砂量を y としたときの回帰式と決定係数 r^2 を示した。 r^2 は、降雨係数 R が0.36, 10分間最大降雨量の積算値が

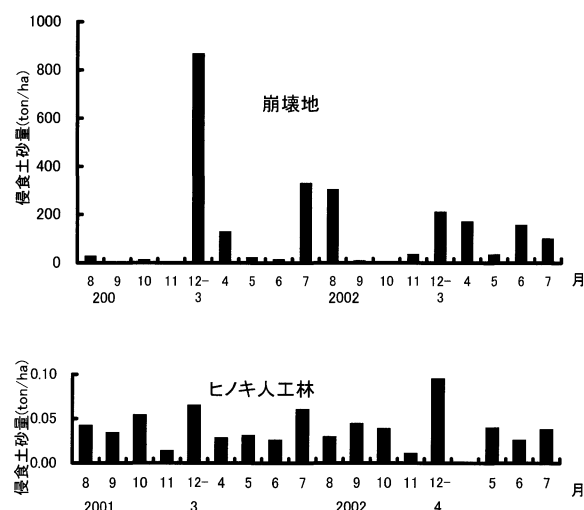


図-3. 崩壊地とヒノキ人工林の期間別侵食土砂量
Surface erosion from the landslide site and the Hinoki artificial forest for individual sampling periods.

0.39, 60分間最大降雨量の積算値が0.38, 降雨加速指数が0.30で、それぞれ危険率5%で有意であった。ただし、降雨量の積算値は r^2 が0.14であり有意ではなかった。

2. ヒノキ人工林侵食土砂量

ヒノキ人工林での年侵食土砂量は、1年目が0.344 ton/ha/yr, 2年目が0.312 ton/ha/yrであった。各年の年侵食土砂量は、崩壊地の年侵食土砂量の0.025, 0.031%で

表-1. 崩壊地およびヒノキ人工林からの侵食土砂量と算出された降雨指標

Amounts of surface erosion from the landslide site and the Hinoki artificial forest together with calculated rainfall indices.

観測期間 (日数)		崩壊地 侵食土砂量 (ton/ha)	ヒノキ林 侵食土砂量 (ton/ha)	降水量** (mm)	降雨係数 R	10分間 最大降雨量 積算値 (mm)	60分間 最大降雨量 積算値 (mm)	降雨加速指数 ($\times 10^3$)
01.7.24～8.27(34)	8月	26.34	0.041	212.0	14.3	51.5	110.0	1200.98
8.28～9.26(30)	9月	1.03	0.033	135.5	4.3	15.0	45.5	92.48
9.27～10.24(28)	10月	11.58	0.053	243.5	26.9	10.5	37.5	95.88
10.25～11.20(27)	11月	1.61	0.012	97.0	2.6	7.0	21.0	14.26
11.21～12.18(28)	12月	*	*	97.0***	—	—	—	—
12.19～02.3.28(100)	1～3月	865.36	0.064	386.5***	—	—	—	—
3.29～4.25(28)	4月	126.81	0.027	185.0	26.4	10.0	38.5	71.23
4.26～5.27(32)	5月	19.83	0.030	180.5	8.6	10.0	32.0	57.76
5.28～6.26(30)	6月	12.03	0.025	93.5	3.2	10.0	26.5	24.78
6.27～7.24(27)	7月	328.32	0.059	338.0	60.5	48.0	127.5	2068.56
合 計		1392.91	0.344	1968.5	146.8			
02.7.25～8.22(29)	8月	301.80	0.028	110.0	16.4	46.0	82.5	417.45
8.23～9.25(34)	9月	6.63	0.043	70.0	0.0	18.0	32.5	40.95
9.26～10.25(30)	10月	0.69	0.037	212.0	17.0	13.0	48.5	133.67
10.26～11.26(32)	11月	33.64	0.010	90.5	0.0	9.5	21.0	18.05
11.27～12.16(20)	12月	*	*	欠測	—	—	—	—
12.17～03.3.31(105)	1～3月	208.41	*	459.5***	—	—	—	—
4.1～4.28(28)	4月	169.00	0.094	334.0	15.8	14.0	48.0	224.45
4.29～5.30(32)	5月	33.02	0.038	169.0	16.4	17.0	39.0	112.05
5.31～6.25(26)	6月	154.36	0.025	233.0	25.0	23.0	60.5	324.22
6.26～7.29(27)	7月	98.45	0.037	475.5	56.6	36.0	112.0	1917.22
合 計		1006.00	0.312	2153.5	147.2			

* 積雪のため測定不能, 3月もしくは4月に測定した侵食土砂量に含まれている。** 崩壊地試験地での降水量。*** 雨量計にヒーターはついていない。

あった。崩壊地と同様に、以上の年侵食土砂量を体積換算すると、1年目は $0.246 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ 、2年目が $0.223 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ であった。また年侵食土深であらわすと、それぞれ $0.0246 \text{ mm}/\text{yr}$ 、 $0.0223 \text{ mm}/\text{yr}$ であった。

ヒノキ人工林の侵食土砂量を測定期間別にみると(図-2)、崩壊地にみられたような大きな季節変動はなく、1年を通じてほぼ一定であった。ヒノキ人工林においても崩壊地と同様に侵食土砂量と降雨指標の関係についてみると、降雨係数 R ($r^2=0.33$)、60分間最大降雨量の積算値 ($r^2=0.28$)、降雨加速指数 ($r^2=0.38$) が危険率5%で有意であったが、10分間最大降雨量の積算値と降雨量の積算値は有意ではなかった。

V. 考 察

1. 崩壊地侵食土砂量

崩壊地における侵食土砂量は、両年とも $1,000 \text{ ton}/\text{ha}/\text{yr}$ を超え、他の土地利用における侵食土砂量とはかけ離れて非常に大きな値であった。この値が異常なのかどうか年降水量で検討してみると、年降水量は1年目が $1,968.5 \text{ mm}/\text{yr}$ 、2年目が $2,153.5 \text{ mm}/\text{yr}$ で両年ともほぼ平年並みであった。すなわち、この両年に限り特異的に多量の侵食土砂が発生したということではなく、この値が常態であると考えられた。崩壊地における年侵食土砂量は、年による差が比較的小さかったので、両年を平均し体積換算すると $857 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ であった。この値は、川口(1953)の示す荒廃山地の年侵食土砂量 $10^1 \sim 10^2 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ より1オーダー近く大きい。また、年侵食土深であらわすと両年の平均で $85.7 \text{ mm}/\text{yr}$ となり、同じく川口(1953)により報告されている東京大学愛知演習林内の崩壊地での年侵食土深 $10 \sim 92 \text{ mm}/\text{yr}$ と比較して同程度からやや大きい値となった。林野庁治山課(1957)が全国各地で調査した荒廃地における年侵食土深 $20 \sim 40 \text{ mm}/\text{yr}$ (杭による方法)や、崩壊地上部から下部への土砂の移動量 $10 \text{ mm}/\text{yr}$ (土砂受け箱による方法)と比べても大きい値であった。このように本崩壊地からの年侵食土砂量は過去の測定例より大きい値となったが、この原因として、本試験地では冬期温暖な地域に比べて凍上融解によって発生する侵食土砂量が多いこと、風化花崗岩地帯で受食性が高いことなどが考えられる。しかし本試験地は、その面積が過去に行われた崩壊地侵食試験地の面積と比べ格段に大きく、また斜面長も長く測定期間も長いことから、崩壊地における侵食土砂量は従来考えられていた値よりかなり大きいことも考えられる。この検証のためには、今後、地質の異なる崩壊地や温暖な地域の崩壊地での測定例を増やす必要がある。

次に侵食に及ぼす気象要因について考察してみると、無降雪期は降雨が、12～3月は積雪前の凍上融解が侵食の主な要因であると考えられるが、両年を平均すると降雨による侵食が58.6%、凍上融解による侵食が41.4%であり、降雨による侵食が6割近くを占め卓越していた。降雨による侵食と凍上融解による侵食は、そのメカニズムや土砂移

動形態など大きく異なるため、まず本項で凍上融解侵食について考察を行い、次項で降雨侵食についてUSLEの検討を含めた考察する。

凍上融解による侵食土砂量は、年により大きく変動するが、その原因として凍上融解日数との関係が認められている(北原ら, 1988)。そこで、本試験地における各年の積雪前の気温について検討する。本試験地では地温や気温は測定していないため、試験地の気温は次のように算出した。まず、飯田測候所(標高482.3m)の気温から標高差を考慮し、100m上昇につきマイナス 0.6°C の通減率を用いた。本試験地の標高は1,060mで、飯田測候所との標高差は577.7mであるため、試験地の気温は飯田測候所の気温からマイナス 3.5°C となる。この値を用いて、飯田測候所における毎時の気温の記録から、本試験地における毎時の気温を求めた。凍上融解が発生した日は、日最高気温が 0°C 以上かつ日最低気温が 0°C 未満とした。

崩壊地からの侵食土砂量が、根雪前の凍上融解による侵食土砂であると考えられる測定期間の凍上融解発生日数を数えた。その結果、1年目(11月21日～12月18日)が28日中23日、2年目(11月27日～12月16日)が20日中15日であった。このように1年目の凍上融解日数は2年目と比べかなり多く、単純に凍上融解発生日数の差が侵食土砂量の発生量の差とも考えられるが、凍上融解の激しさが異なる可能性がある。そこで測定期間12月での凍上融解発生日の日最低気温の積算値(積算寒度)を算出した。積算寒度の対象としては日最低気温が 0°C を下回るものを選んだ。算出の結果、積算寒度は1年目が $-113.8^\circ\text{C}\cdot\text{day}$ 、2年目が $-67.6^\circ\text{C}\cdot\text{day}$ となり、やはり1年目は2年目に比べて凍上融解が激しかったことが推定された。また、凍上融解発生日の日最高気温の平均は、1年目が 8.21°C 、2年目が 4.27°C であった。この日最高気温の平均と積算寒度から、1年目は1日のなかでの較差が激しかったと考えられた。以上のように、1年目は2年目と比較して凍上融解日数、積算寒度、日較差とも大きく、凍上融解による侵食土砂量が多くなったものと推定された。凍上融解による侵食土砂量は、以上の凍上融解日数などである程度推定できる可能性がある。凍上融解侵食は、降雨侵食ほどではないものの年侵食土砂量に占める割合が大きいので、今後その推定方法等の開発が必要である。

2. 降雨による侵食土砂量とUSLEによる検討

次に降雨が侵食に及ぼす影響について、各測定期間の降雨指標と侵食土砂量の関係を検討する。結果で述べたように、各降雨指標を x 、侵食土砂量を y としたときの両者の決定係数 r^2 は、降雨係数 R 、10分間最大降雨量の積算値、60分間最大降雨量の積算値、降雨加速指数が0.35前後で大差なく、それぞれ危険率5%で有意であった(図-4)。すなわち、USLEの降雨係数 R は、これまで山地森林に対して用いられてきた降雨指標と同等の比較的高い信頼性があると考えられた。ところで、 R 以外の従来用いられてきた上記の降雨指標は、地形や土壌などの侵食要因

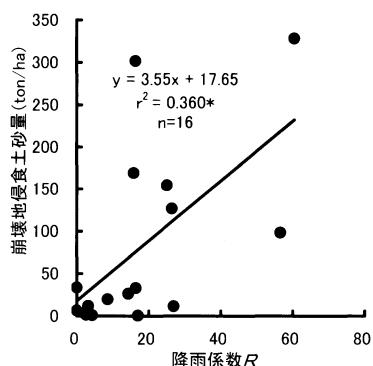


図-4. 崩壊地からの侵食土砂量と USLE の降雨係数 R の関係

Relationship between the amount of surface erosion from the landslide site and the rainfall factor R of USLE.

* は危険率 5% で有意

がまとめて一つの回帰係数として実測の侵食土砂量から算出されるため、侵食土砂量の推定には汎用性が乏しい欠点がある。これに対し、USLE では地形要因である斜面長や傾斜係数あるいは受食性を示す土壌係数などが算出式や表から得られ、演繹的に侵食土砂量が算出されるため利便性が高い。そのため、崩壊地において R に他の降雨指標と同等の比較的高い信頼性が認められたことは、USLE による崩壊地の侵食土砂量推定の可能性が高まったことになり重要な知見といえよう。

また、土壌係数を $K = A / (R \cdot L \cdot S)$ で侵食土砂量から逆算して求めると、1 年目 0.0837, 2 年目 0.1261 となり、平均すると 0.105 であった。この値は、谷山 (1998) が報告した K 値 (ただし SI 単位に換算) の砂質ローム 0.168 や未熟土の 0.186 からポドソル 0.498 の範囲より低く、未熟土の半分程度であった。この原因の一つとして、風化花崗岩で覆われた崩壊地の表面は、より細粒の一般土壌より受食性が低いためと考えられ、比較的良好な値であると判断された。今後、崩壊地の K について研究事例を増やす必要はあるが、風化花崗岩地帯の K は未熟土の半分程度と考えてもよさそうである。

以上のように、USLE の R は崩壊地における侵食土砂量の推定に信頼性があつた。また K を風化花崗岩に対して未熟土の半分程度の 0.105 とし、 R と K のほかに測量結果から算出した L , S と、 $C = 1$, $P = 1$ から侵食土砂量を計算する (III 章参照) と、その侵食土砂量推定値は先に求めた侵食土砂量と R の決定係数と同程度の危険率 5% で有意性が得られるはずである (表-2)。これらのことから、 K については今後いろいろな地質における崩壊地の侵食土砂量測定例から算出し検討する必要があるものの、降雨期の崩壊地における侵食土砂量の推定に USLE は有効であると判断された。

3. ヒノキ人工林侵食土砂量

ヒノキ人工林での年侵食土砂量は、1 年目と 2 年目で大

表-2. 崩壊地からの侵食土砂量 y (ton/ha) と降雨指標 x の関係 (2001 年 7 月～2003 年 8 月)

Relationships between surface erosion from landslide site (y) and rainfall indices (x) from July 2001 through August 2003.

x	回帰式	決定係数 r^2
降雨量の積算値	$y = 0.37x + 10.07$	0.142
降雨係数 R	$y = 3.55x + 17.65$	0.360*
10 分間最大降雨量の積算値	$y = 4.35x - 9.17$	0.386*
60 分間最大降雨量の積算値	$y = 1.92x - 23.25$	0.378*
降雨加速指数	$y = 0.0068x^{0.69}$	0.300*

12 月から 3 月は降雪期のため侵食土砂、降水ともに検討から除いた。* は危険率 5% で有意。

差なく平均すると 0.328 ton/ha/yr であり、川口 (1951) の示す林地・草地での侵食土砂量 0～1.3 ton/ha/yr の範囲であった。また、侵食土深に換算すると両年の平均で 0.0234 mm/yr で、川口 (1953) の示した林地の侵食土深 0.01～0.1 mm/yr の範囲内であった。またこの値は、崩壊地の年侵食土砂量に対して 0.028% であり、極めて小さい値であった。換言すると、崩壊地を森林化すれば侵食土砂量が 1/3,500 に低下すると考えられる。なお、よく問題とされるヒノキ人工林での侵食土砂量の増加はこの試験地に限り認められなかった。この原因は、本試験地では下層植生が比較的多いためと考えられる。また、服部ら (1986) の 6 月から翌年 1 月まで約 8 カ月間のヒノキ人工林 (林床ササあり、傾斜 40°) の侵食土砂量を調べた例と比較すると、本試験地での値は期間が 1 年で長いにもかかわらず約半分となったが、服部らの 6 月の侵食土砂量には試験プロット作成時の影響があるため、両者の差はそれほど大きくないものと考えられる。

ヒノキ人工林の侵食土砂量を測定期間別にみると季節変化が少なくほぼ一定の値であり、崩壊地に比べて 12 月～3 月や春期の侵食土砂量が特に多いということはない。この原因として、ヒノキ人工林では下層植生やリターが、凍上を抑え表土の移動を防いでいるためと考えられる。

侵食土砂量と降雨指標の関係については、ヒノキ人工林においても崩壊地と同様に R は 5% の危険率で他のいくつかの降雨指標と同様に有意であった。すなわち、USLE の諸係数を適当に採用すれば、本ヒノキ人工林においても USLE が適用できることを示している。

そこでヒノキ人工林の作物係数 C を算出すると、試験地の斜面長が 3.8 m であるので $L = 0.415$, 傾斜は 44° であるので $S = 34.8$, ヒノキ人工林の K を崩壊地と同じ値 0.105 とすると、2 年間の平均で $C = 0.0012$ であった。この値は、北原 (2002) の報告した C 値の範囲と比べると最小値であったカラマツ壮齡林と同じであり、小さめではあるがその範囲内であった。したがって、 R を降雨観測値から算出し、それ以外の USLE の諸係数を計算式や表から代入すれば、ヒノキ人工林においても侵食土砂量の推定は信頼のおける値が得られると考えられる。

VI. お わ り に

風化花崗岩地帯の表層崩壊地およびそれに隣接したヒノキ人工林において、侵食土砂量を2年間に測定した。その結果、崩壊地からの侵食土砂量は、これまで報告された値よりやや多く1,200 ton/ha/yrであった。崩壊地からの年侵食土砂量は、降雨と凍上融解により生産され前者が後者に卓越していた。ヒノキ人工林からの侵食土砂量は、これまで知られている観測値と同程度であった。降雨による侵食土砂量については、崩壊地、ヒノキ人工林ともUSLEの降雨係数が他の降雨指標と同程度に有意性が認められ、計算式や表から得られた諸係数を代入すれば、USLEによって崩壊地、ヒノキ人工林とも侵食土砂量の信頼のおける推定が可能であると判断された。

今後は、崩壊地からの侵食の4割を占めた凍上融解侵食量について、その推定方法を開発していくとともに、USLEについては地質別の土壌係数の算出例を増やすなどより広範な汎用性を目指していく必要がある。

末尾ながら、中部森林管理局には試験地設定に際し種々のご協力を賜った。元森林総合研究所長の難波宣士先生には貴重な文献の紹介と貸与を賜った。長野県林務部と土木部、林業土木コンサルタンツからは松川流域の貴重な資料をいただいた。以上の方々に厚く感謝申し上げる。

引用文献

- 服部重昭・阿部敏夫・谷 誠 (1986) 林分条件が異なるヒノキ林の侵食土砂量. 日林関西支講 37: 285-288.
- 服部重昭・阿部敏夫・小林忠一・玉井幸治 (1989) 林分条件が異なるヒノキ林の侵食土砂量 (II)—A₀層の一部除去と降雨強度の影響—. 日林関西支講 40: 382-385.
- 細山田健三・藤原輝男 (1984) 侵食流亡土量の予測に関するUSLEの適用について (I)—USLE適用の背景および降雨係数—. 農業土木学会誌 52(4): 43-49.
- 川口武雄 (1951) 山地土壌侵蝕. 33 pp, (社)日本林業技術協会, 東京.
- 川口武雄 (1953) 山地からの土砂流出とこれに対する治山及び森林の効果. 林業技術 138: 51-54.
- 吉良八郎 (1982) ダムの堆砂とその防除. 392 pp, 森北出版, 東京.
- 北原 曜 (2002) 植生の表面侵食防止機能. 砂防学会誌 54(5): 92-101.
- 北原 曜・真島征夫・清水 晃 (1988) 林道切取法面からの侵食量について (III)—過去4年間の比較—. 日林北支論 36: 176-178.
- 大倉陽一・三森利昭・北原 曜 (1996) 森林施業が表面侵食に及ぼす影響. 日林論 107: 361-362.
- 大倉陽一・落合博貴・Honda, E.A. (1998 a) ブラジルサンパウロ州におけるUSLE標準プロットの概略ならびに表面侵食防止へ向けたデータの活用方法について. 海外研究業務報告 1997年 別冊: 1-5.
- 大倉陽一・三森利昭・北原 曜 (1998 b) USLEによる植被の表面侵食防止効果の評価. 日林論 109: 441-442.
- 大味新学・綱本皓二 (1967) 山腹工斜面の侵食に関する研究. 日林誌 49: 286-292.
- 大味新学・綱本皓二 (1974) 山腹斜面の侵食に関する研究—林種および土壌の相異における降雨加速指数と侵食量の関係について—. 日林誌 56: 379-385.
- 林野庁治山課 (1957) 荒廃地の侵蝕土量について. 治山事業調査報告 I: 1-25.
- 谷山一郎 (1998) 日本におけるUSLE土壌・作物係数の推定. 農林業による土砂流出防止機能評価の課題と展望: 6-14.