

裸地斜面の侵食

澤田 豊明・高橋 保

EROSION ON BARE SLOPES

By *Toyoaki SAWADA* and *Tamotsu TAKAHASHI*

Synopsis

This study describes the erosion and its relating phenomena typical on bare slopes in mountain. Erosion is characterized by various regional factors including geology, topography, weather and vegetation on slopes. The present research has been carried out considering that erosion depends mainly on the gradient and the compressive strength of slope, and the real situation of erosion was clarified through observation and survey of actual slopes in the experimental plots.

1. はじめに

河川流域内で雨が降れば、その流域の下流に流出する水は濁ることが多い。これは流水に土砂が含まれるからで、このような土砂流出の問題を考える場合、上流における土砂生産を考慮しなければならない。特に、土砂の生産に関しては、斜面侵食が重要な役割を演じている。斜面侵食は流域内の様々な場所で発生しており、それらを予測することは非常に難しい。それは場の条件や外力を的確に把握することが困難なことによる。

地質や斜面勾配が異なる裸地斜面を選び、そこで斜面侵食の実態を明らかにするための調査を1985年から実施してきた。本研究では、1993年から1995年までの成果を中心に、斜面侵食における場の条件や外力について若干の検討を行っている。

2. 観測・調査の概要

2.1 観測・調査地域の概要

侵食試験斜面の位置や地質などの概要はFig. 1に示す。この地域は神通川水系高原川の上流で、流域界には穂高岳など3000m級の山々が連なっている。試験斜面は標高1000m以上の場所に設置されているが、11月下旬から裸地斜面において凍上・融解や積雪が認められ、12月から翌年の3月まで、斜面は雪で覆われている。気温は -15°C から 30°C で、凍上・融解の終了は5月中旬、開始は11月上旬となっている。4月から11月までの観測・調査期間の降雨量は1000～2000mmである。

流域の地質は古生代・中生代の堆積岩、中生代および第三紀の火成岩、第四紀の火山噴出物まで広い地質年代の岩石が分布している。標高が3000級の山脈は流域の北部源流を構成しており、中生代および第三紀の花崗岩や流紋岩類からなる山稜は急峻で氷河地形などが認められる。一方、南部の下流部は古生代・中生代の堆積岩、中生代および第三紀の火成岩からなる2000m程度の山体を形成している。

1985年の当初、試験斜面は地質や斜面勾配などを考慮して、11地点に設置された。その後、一箇所は道

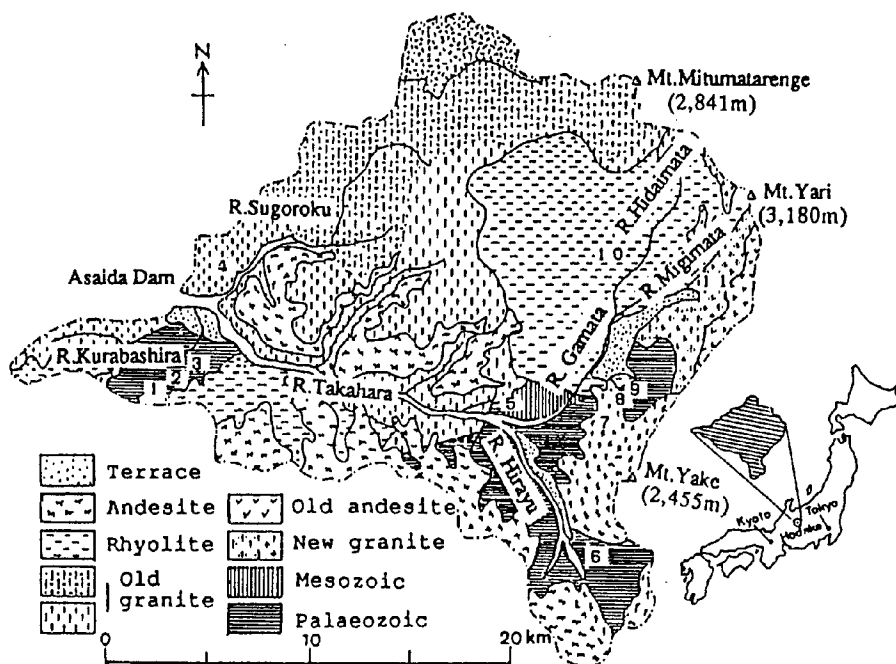


Fig. 1 Geology of test basin and location of test sites (the numbers in the figure)

路工事でなくなり、他の3箇所の試験斜面は草が生えるなど、侵食が認められなくなり、現在、7箇所の地点で侵食が観測されている。Fig. 1 に示されている数字は試験斜面を示している。

2.2 斜面条件と調査法

斜面侵食の実態を検討する場合、対象となる斜面の場の状態を評価することが必要である。このような場の条件を支配する要素として一般的には地質を考慮する必要がある。しかし、侵食に対する抵抗力として場の状態を考えた場合、斜面表層の強度が重要であると考えられる。一方、ここでは、雨滴、表面流、凍上・融解、風などが侵食における外力として考えられ、斜面の風化の程度が問題となる。しかし、風化の程度を総合的に表現する方法が確立されていないので、ここでは、斜面構成材料の圧縮強度を指標とした。圧縮強度は現地の斜面で簡易貫入試験器によって求められている。測定は対象斜面内の測定区間で約1 m 平方の中で約50 点以上で実施された。なお、簡易貫入試験は岩盤の場合は割れ目や細かく破碎された部分に対して実施されている。

試験斜面は斜面長を10 m 程度とし、斜面の下部に幅1 m の土砂採集箱を設置し、斜面から侵食によって移動した土砂を採集箱に捕捉する。1 週間毎に採集箱から土砂を採集し、試験室において乾燥重量と粒径分布が測定されている。

斜面勾配は対象斜面が数 m と短いので、斜面の上下部を結ぶ直線の勾配で代表させている。植生については、自然に生えてくる植物は除去しないこととしている。

裸地斜面に働く外力として降雨、凍上・融解および風が考えられるが、ここでは、降雨量と凍上・融解に関係する気温の測定が行われている。凍上・融解の発生の測定は行われていない。また、降雨時に斜面において発生する表面流の測定や雨滴の衝撃力などの測定も行われていない。

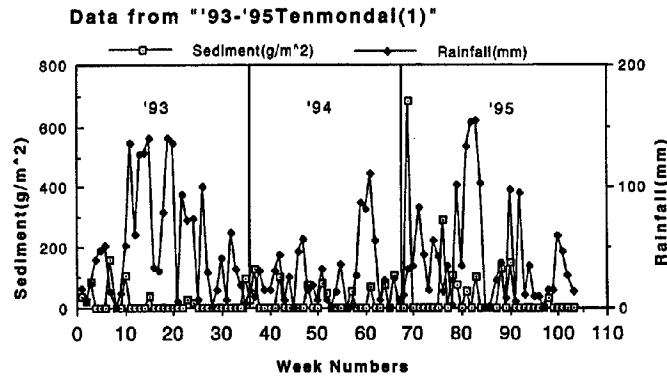


Fig. 2 Hysteretic characteristics of the rate of erosion ($\text{g}/\text{m}^2/\text{week}$) and rainfall (mm/week) on the experimental plot No.1

3. 観測・調査結果

3.1 侵食量の時系列特性

斜面侵食は外力が季節的に変動することに支配され、季節的に変動している。Fig. 2 から Fig. 8 は No.1 から No.9 の試験斜面における侵食量と降雨量の時系列分布を示している。これらの図において、1993 年から 1995 年までの侵食量と降雨量が 1 週間単位で示されている。

Fig. 2 は No.1 の試験斜面における侵食量と降雨量の経年的な関係を示している。この試験斜面は第三紀の流紋岩類からなっており、岩質は凝灰質で風化が進んでおり、簡易貫入試験による圧縮強度は約 $5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ である。この斜面表層を構成する土砂の平均粒径は 2.4 cm である。この斜面勾配は約 52° である。この図において、横軸は 1993 年 4 月 13 日から 12 月 14 日、1994 年 4 月 12 日から 12 月 5 日、1995 年 4 月 18 日から 12 月 5 日まで、順番に週番号が示されている。縦軸は 1 週間の総雨量と侵食量が示されている。侵食量は 1 m^2 当りの土砂の重量で示している。この図において、侵食量の時間的変動をみると、春先に侵食量が多く、時間の経過とともに侵食量が減少し、初冬に再び増加する傾向が認められる。降雨量との関係を見ると、総雨量が 100 mm 程度であっても、侵食が発生していないことも多い。特に、春先は降雨量が少ない場合でも侵食が発生している。1994 年は 1 週間雨量が 100 mm を超える週は 1 回だけと、降雨量が少ない年であったが、侵食は 1 週当りの侵食量は 100 g 以下で少ないが、その頻度は例年に比較して少ないことはない。年間の侵食量は 1993 年が $605 \text{ g}/\text{m}^2$ 、1994 年が $733 \text{ g}/\text{m}^2$ 、1995 年が $1607 \text{ g}/\text{m}^2$ となっている。

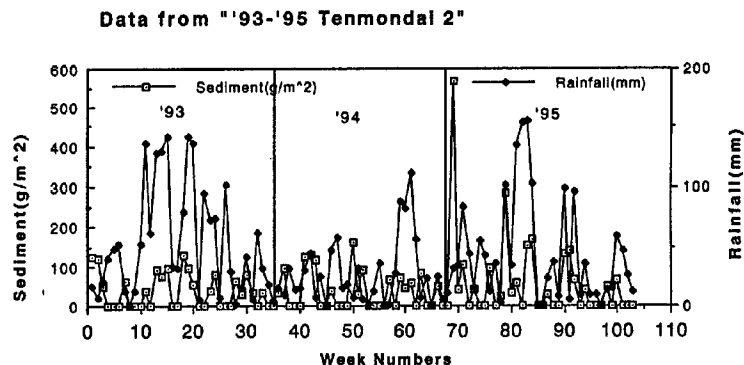


Fig. 3 Hysteretic characteristics of the rate of erosion ($\text{g}/\text{m}^2/\text{week}$) and rainfall (mm/week) on the experimental plot No.2

Fig. 3 は No.2 の試験斜面における侵食量と降雨量の関係を示している。この試験斜面は No.1 と同様の流紋岩類に属するが、岩質は石英斑岩質で硬く、ブロック状に亀裂が入っているが、風化はあまり進んでいない。その亀裂部の圧縮強度は約 11 kg/cm^2 である。斜面表層を構成する土砂の平均粒径は 4.1 cm である。斜面勾配は約 54° である。侵食の発生は No.1 の試験地に比較して頻度が高く、1 週間当りの侵食量は 100 g/m^2 前後となっている。春先に少ない降雨量で侵食が発生する傾向は認められるが、季節的な侵食量の相違は特に認められない。また、降雨量と侵食量の関係も特に認められない。年間の侵食量は 1993 年が 1310 g/m^2 、1994 年が 1147 g/m^2 、1995 年が 2080 g/m^2 となっている。

Fig. 4 は No.3 の試験斜面における侵食量と降雨量の関係を示している。この試験斜面は流紋岩類の石英

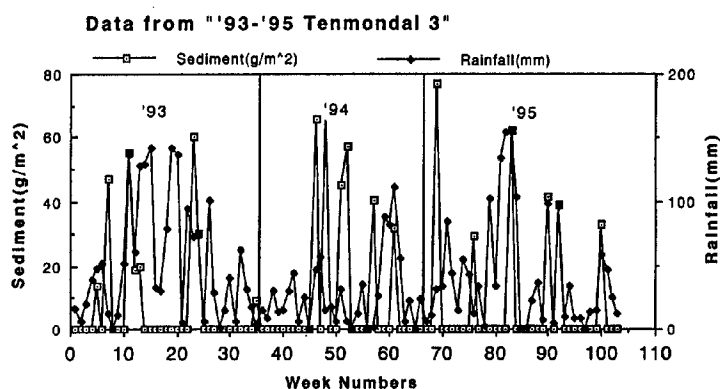


Fig. 4 Hysteretic characteristics of the rate of erosion ($\text{g/m}^2/\text{week}$) and rainfall (mm/week) on the experimental plot No.3

斑岩で構成され、風化は花崗岩のマサ状を呈しており、圧縮強度も 3.3 kg/cm^2 と小さい。この斜面を構成する土砂の平均粒径は 1.2 cm である。斜面勾配は約 50° となっている。侵食量は No.1 および No.2 に比較して小さく、春先の侵食量が少ないことが特徴である。特に、1994 年は 6 月から 8 月にかけて侵食量が多い。全体的に侵食が発生する頻度は少ない。年間の侵食量は 1993 年が 254 g/m^2 、1994 年が 306 g/m^2 、1995 年が 280 g/m^2 となっている。

Fig. 5 は No.6 の試験斜面における侵食量と降雨量の関係を示している。この試験斜面は古生層の粘板

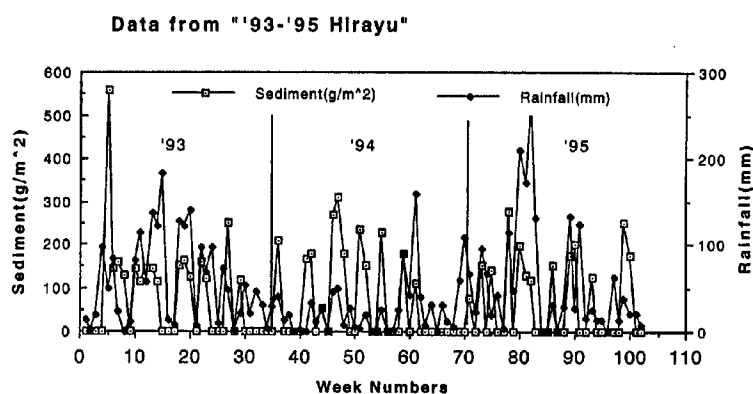


Fig. 5 Hysteretic characteristics of the rate of erosion ($\text{g/m}^2/\text{week}$) and rainfall (mm/week) on the experimental plot No.6

岩、砂岩、石灰岩、凝灰岩、チャートの互層からなる。特に、この斜面の粘板岩・砂岩の互層からなる部分は細かく節理が入り破碎されており、非常にもろく、細粒径の土砂の供給源となっている。試験斜面の風化は進んでおり、圧縮強度は 3.8 kg/cm^2 と小さい。この斜面を構成する土砂の平均粒径は 2.5 cm である。斜

面勾配は約 60° となっている。侵食は1週間に $100 \sim 300 \text{ g/m}^2$ の間で試験地の中では多いほうである。ここでも侵食は春先に多く発生する傾向が認められる。1994 年は4月から9月まで1週間の降雨量が 50 mm 以下であるが、この間の侵食量が多いことが注目される。1995 年にみられるように、1週間の降雨量が 200 mm を超えても侵食量は $100 \sim 200 \text{ g/m}^2$ で少ないことが特徴である。年間の侵食量は1993 年が 2949 g/m^2 、1994 年が 2045 g/m^2 、1995 年が 2153 g/m^2 となっている。

Fig. 6 は No.7 の試験斜面における侵食量と降雨量の関係を示している。この試験斜面は焼岳火山の噴出

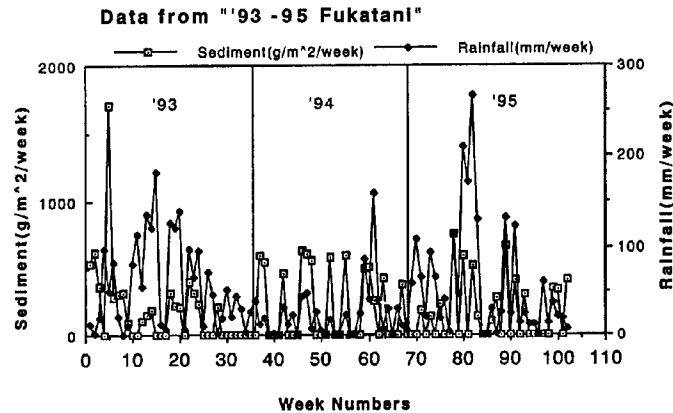


Fig. 6 Hysteretic characteristics of the rate of erosion ($\text{g/m}^2/\text{week}$) and rainfall (mm/week) on the experimental plot No.7

物が堆積して形成されている。岩質は安山岩で溶岩および軽石からなっている。粒径は巨礫から火山灰まで広い範囲である。堆積形態は火砕流・土石流によるものが互層し、足洗谷によって侵食され 20 m から 30 m の崖を形成している。この斜面の堆積物は固結度も小さく、非常にもろく、水流などで侵食されやすい。また、斜面の表層が乾燥している場合、細粒成分は風によって侵食される。この斜面の細粒部では圧縮強度は 0.9 kg/cm^2 と非常に小さい。この斜面を構成する堆積物の平均粒径は約 10 cm である。斜面勾配は約 55° となっている。侵食は1週間に $300 \sim 600 \text{ g/m}^2$ で試験地の中では最も多いほうである。ここでも侵食は春先に多く発生する傾向が認められる。1993 年は6月から7月に降雨が多いが、侵食量は少ない。一方、これに反して1994 年は4月から9月まで1週間の降雨量が 50 mm 以下であるが、この間の侵食量が多いことが注目される。年間の侵食量は1993 年が 6678 g/m^2 、1994 年が 6742 g/m^2 、1995 年が 5558 g/m^2 となっている。

Fig. 7 は No.8 の試験斜面における侵食量と降雨量の関係を示している。この試験斜面は流紋岩類によ

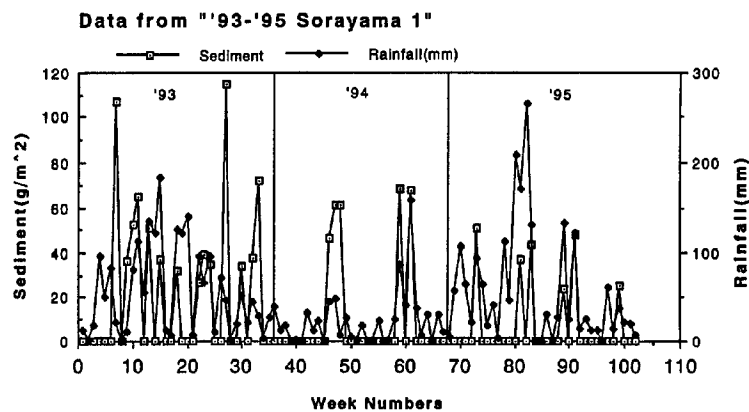


Fig. 7 Hysteretic characteristics of the rate of erosion ($\text{g/m}^2/\text{week}$) and rainfall (mm/week) on the experimental plot No.8

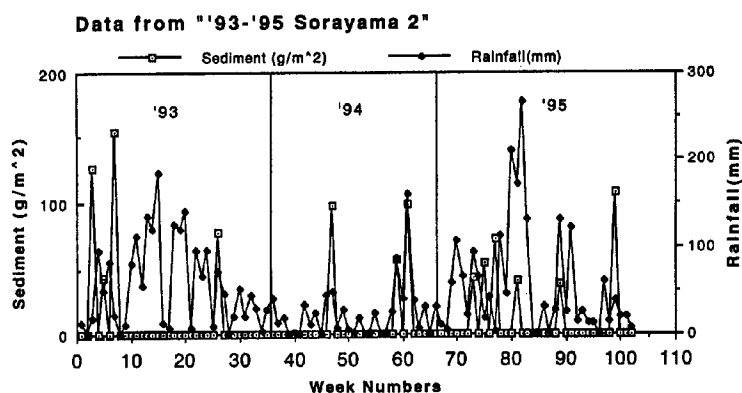


Fig. 8 Hysteretic characteristics of the rate of erosion ($\text{g/m}^2/\text{week}$) and rainfall (mm/week) on the experimental plot No.9

て構成されるが、No.1, 2 および 3 の試験斜面のものとはその起源や岩体が異なっている。岩質は流紋岩、凝灰岩、石英班岩からなっているが、この斜面は石英班岩の破碎構造が発達したもので構成され、温泉作用によって風化が著しく進んでいる。この斜面の破碎部では圧縮強度は 0.6 kg/cm^2 と非常に小さい。この斜面を構成する堆積物の平均粒径は 0.9 cm である。斜面勾配は約 42° となっている。侵食は1週間に $30 \sim 70 \text{ g/m}^2$ で試験地の中では少ないほうである。ここでは侵食は春先にほとんどなく、5月以降に発生している。1993年は6月から7月に降雨が多いが、侵食量は少ない。一方、これに反して1994年は4月から9月まで1週間の降雨量が 50 mm 以下であるが、この間の6月に侵食が発生しているが注目される。1995年は1週間雨量 100 mm 以上に良く対応して侵食が発生している。年間の侵食量は1993年が 740 g/m^2 、1994年が 304 g/m^2 、1995年が 229 g/m^2 となっている。

Fig. 8はNo.9の試験斜面における侵食量と降雨量の関係を示している。この試験斜面はNo.8と同じ流紋岩類によって構成されている。岩質は流紋岩、凝灰岩、石英班岩からなっているが、この斜面は石英班岩の破碎構造が発達したもので構成され、温泉作用によって風化が著しく進んでいる。この斜面の破碎部では圧縮強度は 0.5 kg/cm^2 と非常に小さい。この斜面を構成する堆積物の平均粒径は 1.7 cm である。斜面勾配は約 35° となっている。侵食は1週間に $50 \sim 100 \text{ g/m}^2$ で試験地の中では少ないほうである。この試験地で1993年に侵食が発生したのは、4月から5月に3週、10月に1週のみで、1993年は6月から7月に降雨が多いが、侵食は発生していない。1994年は降雨が少なく、4月から9月まで1週間の降雨量が 50 mm 以下で、この間に侵食が発生したのは6月21日と9月20日の2週のみで、その他10月17日の計3週に侵食が

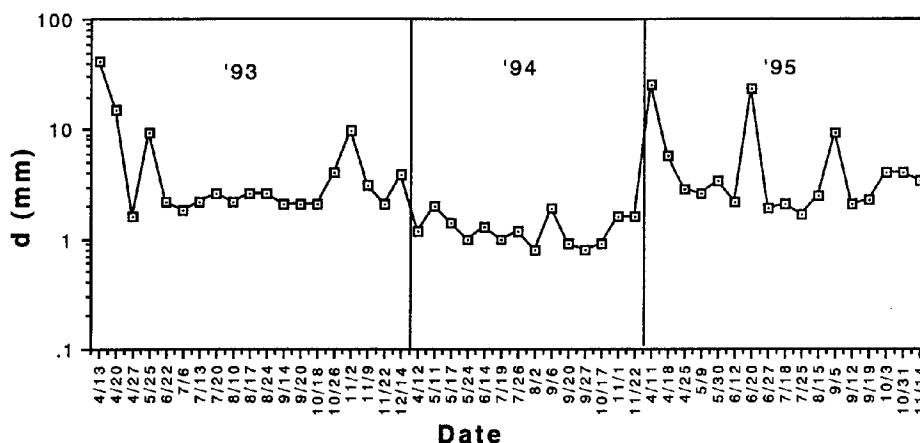


Fig. 9 Hysteretic change of particles mean diameter of sediment on the test site No.2

発生しているだけである。1995 年は 6 週で侵食が発生している。年間の侵食量は 1993 年が 401 g/m^2 、1994 年が 253 g/m^2 、1995 年が 358 g/m^2 となっている。

3.2 粒径分布の変動

斜面侵食によって生産された土砂の粒径は侵食の形態を反映するものとする。そこで、2, 3 の試験斜面について粒径の変動を見てみよう。**Fig. 9** は試験斜面 No.2 において測定された生産土砂の平均粒径の変動を示している。この図から平均粒径が季節的に変動していることが認められる。春先の 4 月、5 月に粒径が 10 mm 程度と大きく、6 月から 10 月に粒径が 1 ~ 3 mm と小さくなり、11 月になると粒径が再び大きくなる。

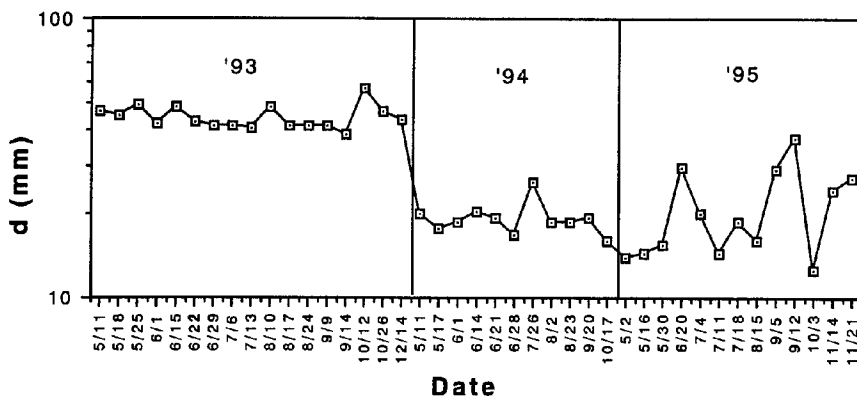


Fig. 10 Hysteretic change of particles mean diameter of sediment on the test site No.6

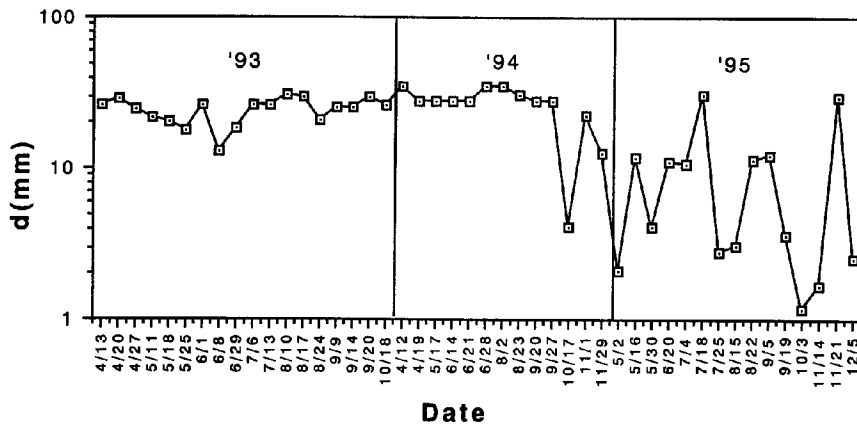


Fig. 11 Hysteretic change of particles mean diameter of sediment on the test site No.7

Fig. 10 は試験斜面 No.6 において侵食された土砂の平均粒径を示す。1993 年の平均粒径は 40 ~ 50 mm でほとんど変動が認められず、1994 年と 1995 年は 10 から 30 mm で変動している。ここでは、試験斜面 No.2 のような季節的変動は認められない。

Fig. 11 は試験斜面 No.7 において生産された土砂の平均粒径の変動を示している。この図において、1994 年の 10 月を境に前半と後半で平均粒径の変動が大きく異なっている。前半の平均粒径は 10 ~ 30 mm の間で変動幅は小さい。後半は 1 ~ 30 mm の間で不規則に大きく変動している。

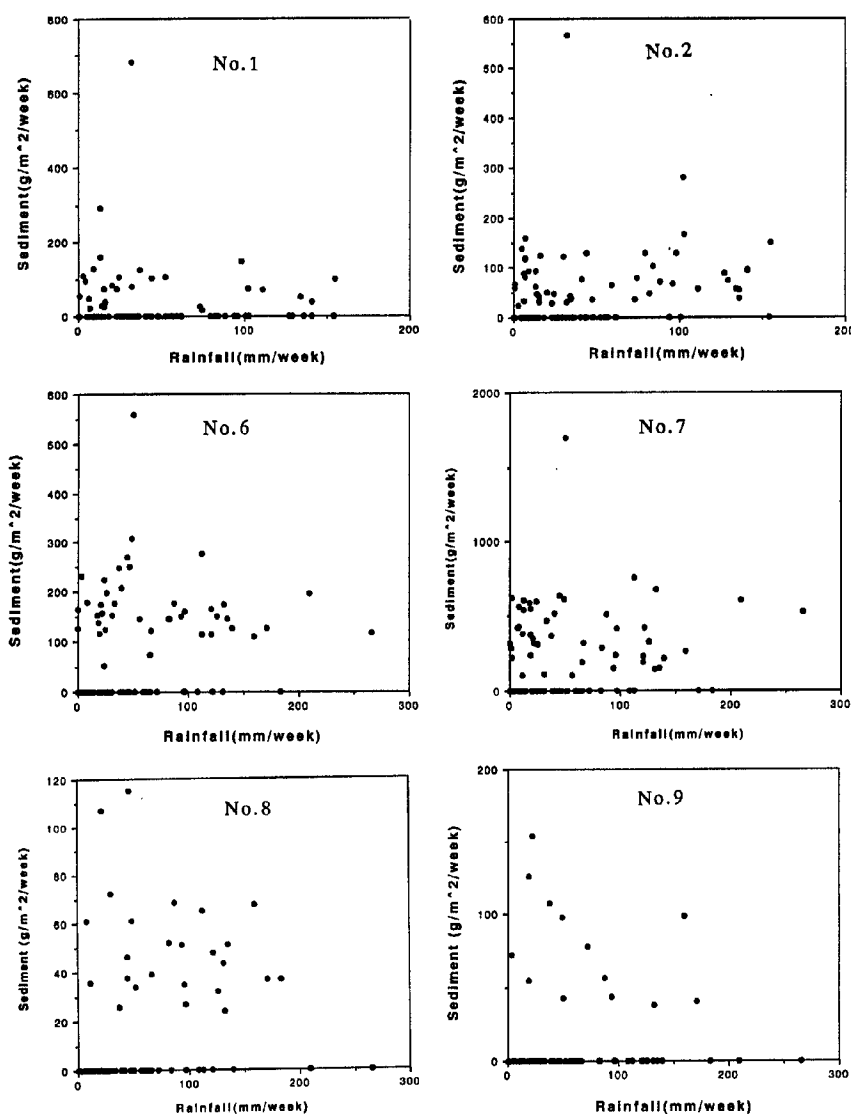


Fig. 12 Relation between rainfall (mm/week) and the rate of erosion ($\text{g/m}^2/\text{week}$) in the experimental plots

4. 観測結果の考察

4.1 侵食量と降雨特性

一般に、斜面侵食において降雨が大きな役割を演じていると考えられているが、それらを的確に評価することは困難である。ここでは、各試験斜面において測定された侵食量と降雨量について若干の検討を行う。侵食量と降雨量の関係は、細部では履歴性などの影響を受けているため、その対応は良くない。Fig. 12 は各試験斜面における 1 週間毎の侵食量と雨量の関係を示したものである。この図から侵食量と降雨量において明瞭な関係は認められないが、全体的な傾向として、降雨量が多くなるに従って侵食量が減少している。これには凍上・融解と降雨による侵食を区別していないことが反映されているものと考えられる。したがって、今後、少なくとも 1 週間の凍上・融解回数などの測定が必要であろう。

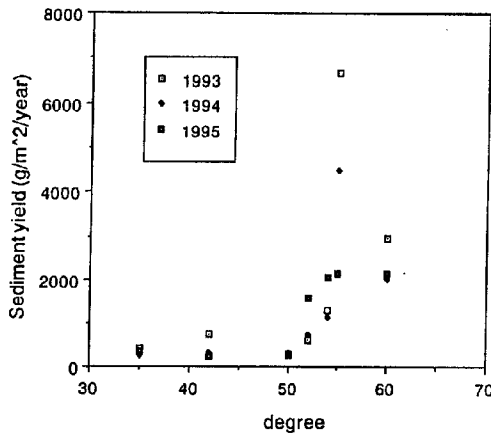


Fig. 13 Relation between the rate of erosion ($\text{g/m}^2/\text{year}$) and the gradient of slope

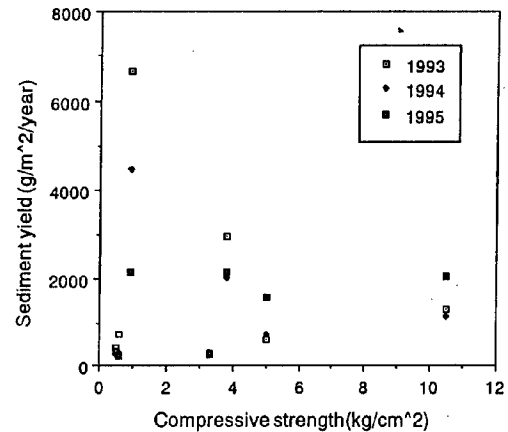


Fig. 14 Relation between the rate of erosion ($\text{g/m}^2/\text{year}$) and the compressive strength (kg/cm^2)

4.2 侵食量と場の特性

侵食において場の特性がどの様に関係しているかを明らかにするために、斜面勾配と圧縮強度について検討を行う。Fig. 13 は1年間の侵食量と斜面勾配の関係を示したもので、斜面勾配と侵食量の関係が比較的明瞭に現れている。しかし、降雨時に斜面上にどのような表面流が発生しているか観測が行われていないため、斜面勾配が表面流の発生時の水理特性を支配しているのか、土質的な効果としての役割を果たしているのかは分からない。Fig. 14 は圧縮強度と1年間の侵食量の関係を示したものであるが、圧縮強度が大きくなると侵食量が少なくなる傾向が認められる。しかし、圧縮強度も土砂の採集毎に測定されていないので、斜面の凍上・融解や侵食による表層の変化の影響が考慮されていない。これらが今後の課題であると考えられる。

4.3 斜面侵食の長期的変動

この流域においても航空写真などから50年前に発生した崩壊地が現在も裸地となっているのが認められるように、山腹に発生した崩壊などによる裸地斜面は長い年月を経て植生が回復している。ここに設定された試験斜面の多くは1960年頃に作られた道路の切り取り斜面である。特に、人工的に緑化工事が行われていないために、約30年を経た現在も裸地となっている。

Fig. 15 はこれらの試験斜面における1985年から1995年までの侵食状況と観測期間の降雨量を示したも

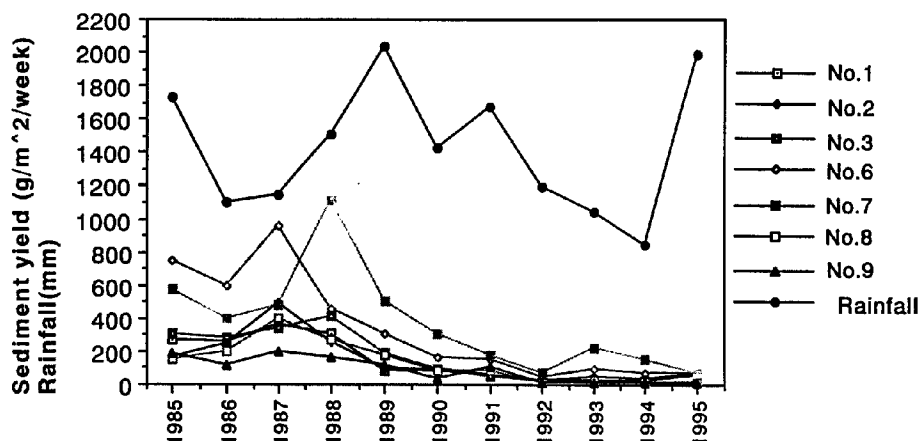


Fig. 15 Hysteretic characteristics of the rate of erosion ($\text{g/m}^2/\text{year}$) and rainfall (mm) on the experimental plots

のである。侵食量は 1987 年に若干の増加をみせるが、全体的な傾向として毎年減少し、現在では初期の 1/4 程度になっている。侵食量と降雨量との間に関係は認められず、侵食量の減少が降雨量などの外力に直接関係していることは考えにくい。したがって、このような理由として、場の条件の変化が支配的な要因と考えられる。しかし、斜面勾配や圧縮強度の大きな変化が認められないので、計測されない微少な場の変化の存在についても検討する必要がある。なお、1991 年頃から No.5 の試験地には草が生えて侵食が認められなくなっている。さらに、No.8,9 の試験地でもまばらに草が生えてきている。以上のように、現在、試験斜面では次第に侵食量が減少してきているが、表層土砂の移動が植物の種子の発芽・定着条件を満足するには至っていないようである。

5. おわりに

以上、本研究では、試験斜面における裸地斜面の侵食の観測・調査結果に基づいて、侵食の実態を明らかにすると共に、斜面の条件および外力と侵食の関係について若干の考察を行った。それらの主要な結果はつぎのようである。

1. 裸地斜面の侵食は斜面に積雪がなく、凍上・融解が頻繁に発生する期間に発生するが、凍上・融解によって直接侵食が起ころなくとも、凍上・融解がその後の斜面侵食に関与している。
2. 侵食による土砂生産量は 1 年を周期として経年的に変化する。
3. 裸地斜面の侵食は長期継続するが、10 年程度の期間で約 1/4 に減少する傾向が認めれる。
4. 降雨量と侵食量の関係については、一義的に議論できないが、そのためには斜面表層の変化を評価する必要がある。
5. 今後の課題として、凍上・融解の発生回数、降雨による斜面上の流れ、土砂粒子の結合力と土中の含水率などの測定とその評価が残されている。

謝 辞

最後に、この観測・調査を実施するに際して協力して頂いた京都大学防災研究所附属穂高砂防観測所の志田正雄技官に感謝の意を表します。また、調査において種々の便宜を計って頂いた京都大学理学部附属飛騨天文台の関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 澤田豊明・芦田和男：裸地斜面における土砂生産，水工学論文集，第 34 巻，1990，pp.355-360.
- 2) 澤田豊明・高橋 保：裸地斜面における土砂生産，京都大学防災研究所年報，第 36 号，B-2，1993，pp.425-431.
- 3) Sawada, T., Takahashi, T.: Sediment yield on bare slopes, Proceeding of the International Symposium on Forest Hydrology, Tokyo, Japan, 1994, pp.471-478.