

盛土のり面の植生保護工に関する研究 (III)

盛土実験斜面における植生の生育,
土砂流出および降雨流出について

江崎 次夫*・井上 章二**

Studies on the Turfing Work for the Protection of Banking Slope (III)

On growth of vegetation, sediment yield and rainfall
runoff on the experimental banking slope

Tsugio EZAKI and Shoji INOUE

Summary : In order to investigate the actual conditions of surface erosion on the banking slope, the authors observed the rainfall runoff and the sediment yield on the experimental banking slope during the period from the end of June to the end of December in 1977. This research has been carrying out with the lysimeter settled in the Kasuya University Forest of Kyushu University. Each plot has a length of 2.20m, a width of 2.00m and an inclination angle of 30°. The materials used in this experiment were Yomogi and Kentucky 31 fescue (K-31-F) as the species of vegetation, and red soil and decomposed granite as the type of soil. The soil hardness based on compaction was divided into three degrees, ①: about 15mm of hardness index, ②: about 20mm of hardness index, ③: about 25mm of hardness index with the Yamanaka's soil hardness tester. Number of expectation of grasses per square meter of each vegetation plot was five thousand. The seeds of vegetation were sowed in grooves of 3cm depth and 20cm width at an interval of 50cm on the slope. The results may be summarized as follows:

1. There was no significant relation between the growth height of K-31-F and the soil hardness. However, in the case of Yomogi plots, some relationship was found between them.
2. The vegetation work showed fairly to have the effect on controlling the sediment yield and the surface flow.
3. On all experimental plots, strong relations were found between the soil hardness and the sediment

* 附属演習林 University Forest

** 九州大学農学部 Fac. of Agr., Kyushu University

yield, the surface runoff depth and the infiltration water depth.

4. The rainfall intensity had direct effects upon the grain-size distribution of the sediment.
5. In the case of red soil plot, median diameter of the grain-size on the soil surface became smaller every time of rainfall. In the case of decomposed granite plot, however, the constant tendency could not be found.
6. The correlation between the grain-size distribution measured by the photogrammetry on the soil surface and the grain-size distribution measured by the mechanical analysis of sediment was not significant.
7. Yomogi plots showed most copious evapo-transpiration among all experimental plots.
8. The sediment yield of the control plots increased proportionally to the approximate square of the maximum 10-minutes rainfall intensity.
9. The following formula is empirical equation obtained by dimensional analysis of the experimental results.

$$\frac{E}{\sigma \cdot d} = A \left(\frac{i^2}{g \cdot d} \right)^B - C$$

where: E = sediment yield (gr/cm^2)

σ = density of sediment (gr/cm^3)

d = grain-size of sediment (cm)

i = maximum 10-minutes rainfall intensity (cm/sec.)

g = acceleration of gravity (cm/sec^2 .)

A , B and C = constants; the experimental values were

$$A = 10^{6.59}, B = 1.00 \text{ and } C = 0.043.$$

要 旨 のり面に植生保護工を施工した場合の保護効果機能の実態を解明するため、ライシメーターを利用した盛土実験斜面を造成し、植生の生育量、土砂流出量、表面流下水量および浸透流出水量について、測定をおこなった。1977年7月～12月の半年間の、実験結果を要約すると、次のとおりである。

- 1) ケンタッキー31 フェスク (K-31-F) の生育は、土壌の締め固めにあまり影響されないが、ヨモギの生育は、土壌の締め固め度合が大きくなるほど優れている。
- 2) 植生工区の土砂流出抑止作用および表面流下水抑制作用は、かなり高い。
- 3) 土砂流出量、表面流下水量および浸透流出水量に最も影響を及ぼしたのは、植生、土壌の種類および土壌の締め固めの相違の3要素中、土壌の締め固めの相違である。
- 4) 流出土砂の粒径分布は、降雨強度に大きく影響される。
- 5) のり面表面の土砂の写真測定による粒径分布は、降雨回数の増加とともに、赤土区では、しだいに粒径が小さくなり、地表面粒子は、均一化していく。マサ土では、のり面上流端部においては、粒径は均一化していくが、下流端部では、一定の傾向は認められない。
- 6) のり面表面の写真測定による粒径分布と流出土砂の粒度試験による粒径分布との間には、一致した傾向は認められない。
- 7) 蒸発散量は、ヨモギ区が最も多く、降雨量の70%～75%である。蒸発散量は、同じ草本類でも、その生理・生態的特性および生長の相違によって、かなり差が認められる。
- 8) 裸地区の土砂流出量は、土壌の種類および土壌の締め固めの相違に関係なく、10分間最大降雨量の約2乗に比例している。
- 9) 裸地区の土砂流出量を、10分間最大降雨量との関連で、無次元表示し、土砂流出量を定量的に表示することのできる実験式を、次のごとく提案した。

$$\frac{E}{\sigma \cdot d} = A \left(\frac{i^2}{g \cdot d} \right)^B - C$$

ここに、 E は単位面積当りの土砂流出量 (gr/cm^2)、 σ は土の密度 (gr/cm^3)、 d は流出土砂の粒径 (cm)、 g は重力の加速度 (cm/sec^2)、 i は10分間最大降雨量 (cm/sec)、 A 、 B および C は定数。これまでの測定結果から、 $A = 10^{6.59}$ 、 $B = 1.00$ および $C = 0.043$ となった。

I はじめに

本研究の目的は、裸地斜面の表面侵食に対し、定量的な解析を試み、さらに、植生保護工を施工した場合の保護効果機構の実態を解明することであり、最終的には、植生による保護効果を定量的に表示することである。

今回、九州大学粕屋地方演習林に、ライシメーター利用の盛土のり面試験地を設定し、実験を開始した。ここでは、1977年7月～12月の半年間、植生の生育状況、土砂流出量、表面流下水量および浸透流出水量を詳細に測定した結果に基づき、若干の考察をおこなうとともに、土砂流出量実験式の提案をおこなう。

本研究実施にあたり、終始ご指導、ご助言あるいはご協力をいただいた九州大学農学部、末勝海教授、中尾博美助教授、森田紘一助手、中島勇喜助手（現山形大学農学部、助教授）、長澤喬教務員、砂防工学研究室の大学院生・学生の方々、ならびに、試験地設定を許可され、資材購入、試験地設定等に、ご協力いただいた九州大学演習林、加藤退介教授、粕屋地方演習林長、汰木達郎助教授はじめ、演習林職員の方々に、深く感謝の意を表す。さらに、研究全体にわたり、ご指導、ご助言をいただいている愛媛大学農学部、伏見知道教授、小川滋助教授に、厚くお礼申し上げる。

なお、本報告は、内地研究員として、九州大学農学部でおこなった実験の一部を、とりまとめたものである。その概要については、すでに、第33回日本林学会九州支部大会（那覇）および第89回日本林学会大会（東京）で発表した。

II 試験地の概況

試験地は、九州大学粕屋地方演習林、9林班わ小班内の、コンクリート製土砂置場で、これをライシメーターに改造し、実験盛土のり面を造成した。ライシメーターの南後方10m位に、高さ3m～5mの切取りのり面が、東後方10m位に、高さ10mの切取りのり面があるが、実験盛土のり面は、北に面しており、北側に支障となるものはない。試験地付近の標高は約80m、年平均気温は15.5℃、最高気温は7月で32℃前後、最低気温は1月で-1℃前後であり、年降水量は1,600mm内外である。

III 材料および実験方法

試験には、供試土壌として、マサ土（福岡県太宰府町産、黒雲母花崗岩）と赤土（演習林内産土壌）との2種類を用い、植生は、ヨモギとK-31-Fを使用した。土壌の締め固め程度計測には、山中式土壌硬度計を用いた。盛土のり面で、植生を使用する場合、締め固めの度合は、一般に硬度指数18mm～27mm¹⁾とされているので、締め固めは、①その下限値に近い硬度指数15mm前後、②その中間値に近い硬度指数20mm前後および③その上限値に近い硬度指数25mm前後の、3種類に分けた。植生工区の成立密度は、5,000本/m²とし、のり面に20cm幅で、30cm間隔に、深さ3cmの植溝を設けて播種し、その後、肥料をNの純量で10g/m²施した。供試土壌のそれぞれの粒径加積曲線を、Fig. 1に示す。中央粒径は、マサ土1.15mm、赤土0.14mmである。土粒子比重は、マサ土2.63、赤土2.50である。さらに、使用した種子の純量率および発芽率等はTable 1に、試験区の配置はFig. 2に、構造および実験装置はFig. 3に示す。

各試験区の大きさは、幅2m、勾配30°、斜面長2.20m（水平長1.91m）である。各区の下方に受板（トタン）と、樋をとりつけ、ブリキ箱（20ℓ）に導き、流出土砂ならびに表面流下水を集水した。浸透流出水は、人工不透水層（ビニールトタン）を地中に設け、斜面下流端50cm深において、ブリキ箱に集水し、測定した。また、試験区外

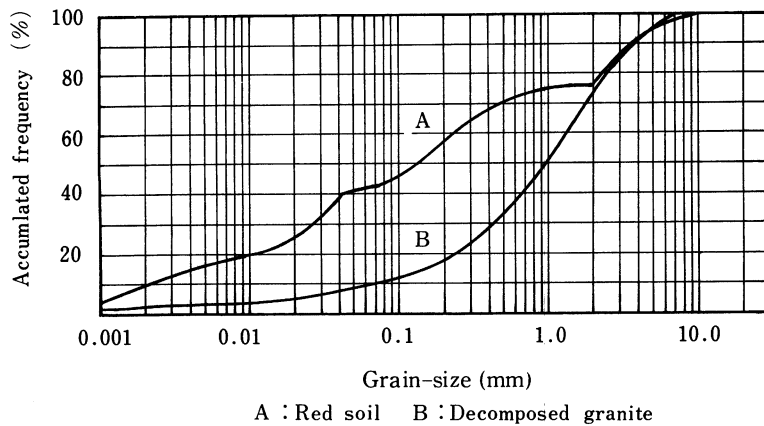


Fig. 1 The grain-size accumulation curve of used soils

Table 1 The conditions of seeds for seedlings and the germination rate of the seeds

Species	Rate of germination %	Rate of purity %	Number of seed grains per one gram	Number of expectation of grasses per m ²	Seed quantity gram per m ²	Number of germination per one row	Germination rate %
Yomogi	32	81	11,080	5,000	15.00	300~400	24~32
Kentucky 31 fescue	87	96	399	5,000	1.74	300~400	24~32

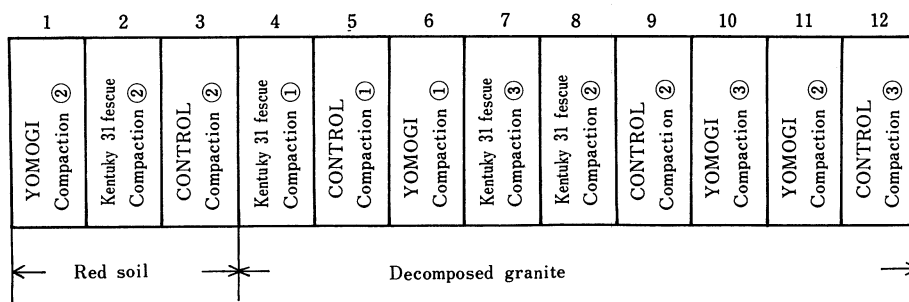


Fig. 2 Arrangement of experimental plots

からの雨水が受水装置内に入りこまぬよう厚手のビニールでおおいをした。雨量は、自記および貯水型雨量計を試験地の近傍に設置して測定した。さらに、のり面表面の土壤粒径組成の変化を定期的に写真撮影して、計測するために、裸地区の3区と5区とに、Fig. 4のように、8個ずつの格子点を設定した。

測定は、降雨時間が短いときは、1降雨ごとに土砂流出量および表面流出量を測定し、浸透流出量については、降雨開始後30分~1時間ごとに測定、降雨終了後は1時間~12時間ごとに、浸透流出が終了するまで、測定を続け

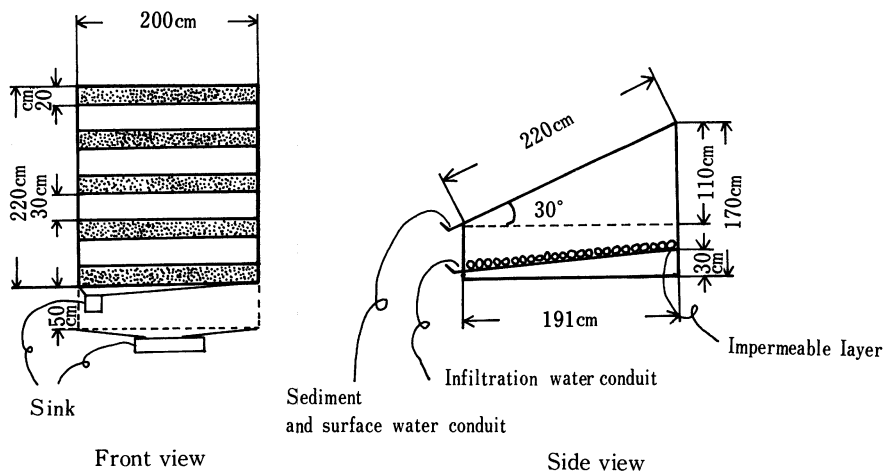


Fig. 3 The structure of the experimental apparatus

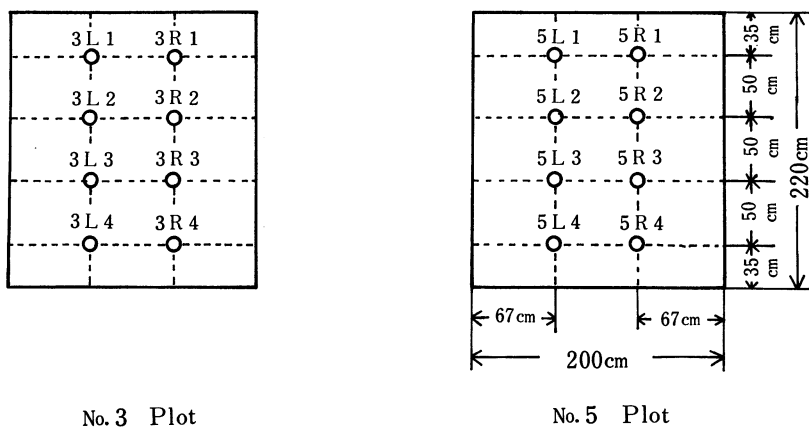


Fig. 4 The grid system on surface grain-size analysis

た。降雨が長時間におよぶ時は、1時間ごとに、土砂流出量および表面流出量を測定した。浸透流出量については、短時間の場合と同様である。流出土砂は、炉乾燥重量測定後、日本工業規格“土の粒度試験法”に基づいて、粒径分布を求めた。

植生については、発芽・生育状況および成立密度等を2週間ごとに測定した。

IV 結果および考察

1) 植生の生育

植生の生育状況を、Fig. 5 に示す。

播種は、6月26日で、発芽はヨモギが6月29日～30日であり、K-31-Fは6月30日～7月2日であった。発芽は、すべての区で、ヨモギの方がK-31-Fよりも、1日～2日早かった。このように、播種後、3日～6日で発芽したのは、発芽のための地温および水分が十分あったことの、裏付けであろう。

Fig. 5 に示すように、赤土区およびマサ土の硬度指数20mm区における生育状況は、マサ土区の方が赤土区に比

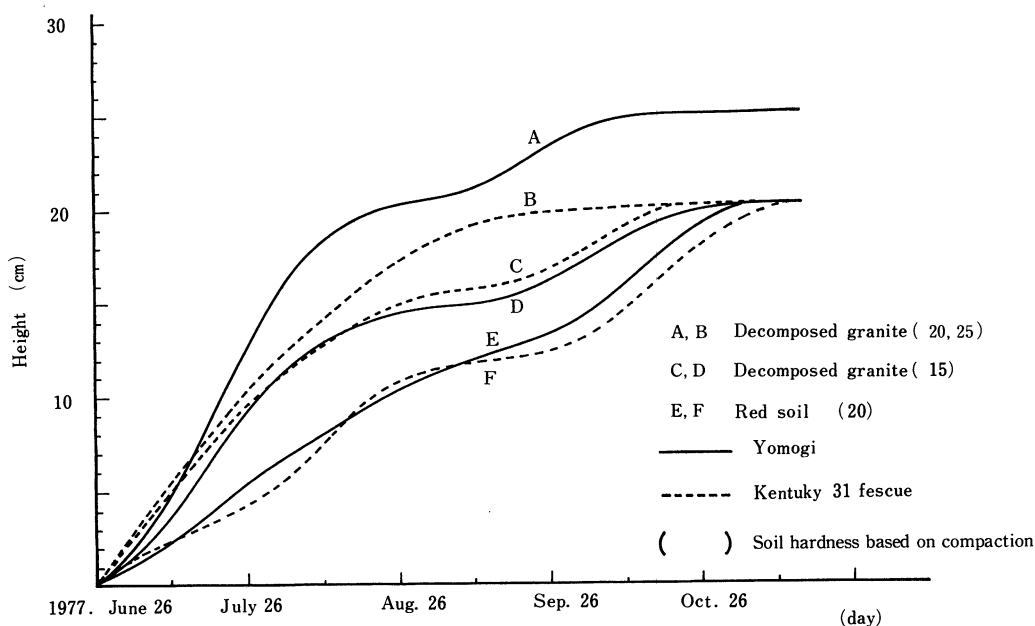


Fig. 5 The growth curve of each grass

べ、ヨモギ、K-31-Fともに、初期生長ならびに発育途中の生育も良好である。特に、ヨモギでは最終的に、平均草丈で、5cmの差が認められる。しかし、K-31-Fの場合、発育途中では、マサ土の方がかなりすぐれているが、最終的には、赤土とマサ土における生育量は、あまり変わらないようである。

赤土区におけるヨモギとK-31-Fの生育には、あまり差が認められない。この原因は、赤土には、マサ土に比べ、粘土分が多いために、根が入りにくいと、土壌孔隙が少ないために、根の呼吸および水分吸収が妨げられ、生育が抑制されたためと考えられる。

マサ土におけるヨモギの生育は、硬度指数 15mm, 20mm および 25 mm とでは、発芽・初期生長はあまり変らないけれども、それ以後は、かなり生育に差が認められる。K-31-Fの硬度指数の相違による生育状況については、ヨモギ同様、硬度指数 15mm で、発育途中の生育が劣るが、ヨモギと異なって、最終的には、硬度指数に関係なく、同様な生育量に達している。また、これに関連して、愛媛大学米野々演習林のマサ土（黒雲母風化花崗岩）で、ポット試験をおこなった結果²⁾では、硬度指数が 30mm になると、ヨモギおよびK-31-Fともに、硬度指数 20mm および 25mm の試験区に比べ、明らかに生育が劣ってくるようである。

このように、生育が硬度指数に、かなり影響されるのは、硬度指数が低いと、土壌中の孔隙が多くなり、日照りや風の影響等を受けやすく、そのために乾燥し、水不足によって、根の水分吸収が困難になるためだと考えられる。また、逆に、硬度指数が高いと、草本植物の根の伸長圧は、一般に 10kg/cm^2 (硬度指数 23.3mm) 前後³⁾とされており、硬度指数 15mm は約 3kg/cm^2 , 20mm は約 6kg/cm^2 , 25mm は約 14kg/cm^2 そして 30mm は約 40kg/cm^2 となることから、根の伸長が、制限されるとともに、土壌孔隙も減少し、根の呼吸および水分吸収が困難になり、生長が衰えるものと考えられる。

山寺⁴⁾は、関東ロームを用いた実験から、K-31-Fの場合、硬度指数 8mm ~ 10mm (1.0kg/cm^2 ~ 1.4kg/cm^2) 程度、いいかえれば、気相率 30% 近くが、最も生長が良好であることを報告しているが、現実の盛土のり面では、硬度指数 8mm ~ 10mm といった低い値は、土質安定の面から考えられない。さらに、硬度指数 20mm よりも、15 mm の方が、生長はすぐれていることも報告しているが、著者らの今回のマサ土における実験結果とは、一致しなかった。

2) 土砂流出量

測定期間中、33回の降雨があり、その内18回に土砂流出が認められた。この18回の降雨資料をTable 2に、各区間の土砂流出量の比較のためにおこなった分散分析結果をTable 3に、土砂流出量と土壌の締め固めとの関係を、Fig. 6に示す。

総土砂流出量で比較すると、締め固め度合が同じ場合、植生工区は裸地区に対し、赤土面で、ヨモギ区34.5%およびK-31-F区38.5%、マサ土面で、ヨモギ区1.3%~36.5%およびK-31-F区2.8%~10.0%である。4区および6区以外のすべての植生工区と裸地区との間には、5%~1%レベルの有意差が認められた。各植生工区の土砂流出抑止作用の高いことが実証された。

Table 2 The observed values of rainfall

Rainfall No.	Date (1977)	Total rainfall mm	Rainfall duration min.	Maximum 10-minutes rainfall intensity mm/10min.
1	July 9~10	13.0	70	5.0
2	July 13	5.0	10	5.0
3	July 13	3.5	10	3.5
4	July 14	8.5	30	6.5
5	July 17	14.7	150	2.0
6	July 19	22.9	290	2.0
7	July 20	1.9	10	1.9
8	Aug. 8	41.1	140	10.0
9	Aug. 23~24	53.5	550	4.0
10	Sep. 2	8.3	20	5.0
11	Sep. 11	22.8	50	17.0
12	Oct. 3~4	38.4	580	2.0
13	Nov. 1~2	51.6	600	2.5
14	Nov. 8	20.5	120	11.5
15	Nov. 16~17	59.3	570	3.0
16	Nov. 21~22	8.5	130	2.0
17	Nov. 29	5.4	70	2.0
18	Dec. 1	9.0	140	1.5

Table 3 Analysis of variance of the sediment yield in each plot

plot No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		6.84	110.19**	53.28	2.27	37.82	37.55	44.87	74.33	48.48	41.77	105.95*
	2		103.35*	60.12	9.61	44.66	44.39	51.70	67.49	55.32	48.61	99.11*
		3		163.48***	112.97**	140.02***	147.75***	155.06***	35.86	158.68***	151.97***	4.23
			4		50.50	15.45	15.72	8.41	127.61**	4.79	11.50	159.24***
				5		35.04	34.77	42.08	77.10	45.70	38.99	108.73**
					6		0.27	7.03	112.15**	10.65	3.94	143.78***
						7		7.31	111.88**	10.93	4.22	143.51***
							8		119.19**	3.62	3.09	150.82***
								9		122.81**	116.10**	31.62
									10		6.71	154.44***
										11		147.73***
											12	

* Significance at the 10% level
 ** Significance at the 5% level
 *** Significance at the 1% level

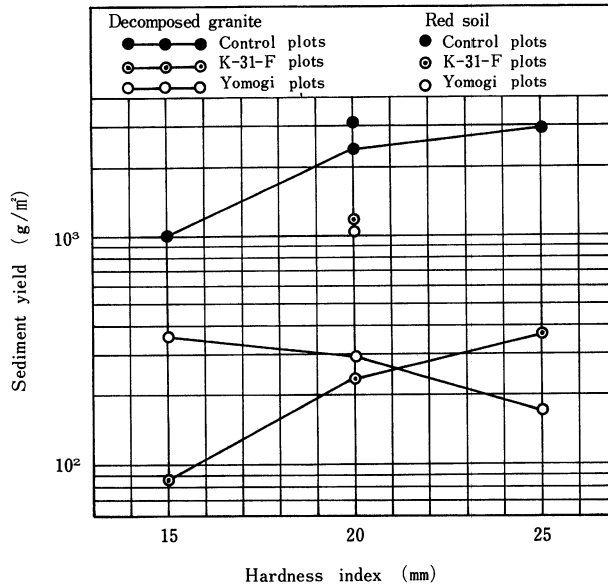


Fig. 6 The relation between the sediment yield and the soil hardness based on compaction

次に、同様に総土砂流出量で比較した場合、植生およびマサ土と赤土との相違によって、有意な差は認められない。しかし、1降雨ごとに比較すると、10分間最大降雨量が最も大きかったNo. 11の降雨(17.0mm/10min.)で、2区と8区との間に1%レベルの有意差が認められた。締め固めの相違による影響は、総量で、5区と12区との間に5%レベルで、1降雨ごとでは、前に述べたNo. 11の降雨で、5区と9区および5区と12区との間に1%レベルの有意差が、それぞれ認められた。

全体的にみた場合、土砂流出量に関する「植生の種類の相違」、「土壌の種類の相違」および「土壌の締め固めの相違」の3要素中、最も影響をおよぼしているのは、土壌の締め固めの相違であると考えられる。Fig. 6から明らかなように、裸地区では、締め固め度合の増大に伴い、土砂流出量が増加している。このような現象は、土壌孔隙の差に起因するものと考えられる。すなわち、締め固め度合が大きい場合、土壌孔隙が小さくなるために、岩垣・土屋⁵⁾が述べているように、雨滴衝撃によって、土砂が飛散し、表面土壌が攪乱され、それに伴い、土塊の破壊が始まり、この破壊現象によって、地表面が目づまりを起し、締め固め度合の小さい場合に比べて、のり面表面が難透水性になりやすくなり、表面流下水量が増すためと考えられる。さらに、地表面が傾斜しているとか、雨滴が地表面に斜めにあたるときは、雨滴による土砂の飛散作用のみによっても、土砂は輸送され、地表面は侵食されると述べており、この場合、締め固め度合が大きいと、小さい場合に比べ、雨滴衝撃力緩和作用は、小さくなるものと考えられる。ヨモギ区の場合、裸地区とは、まったく逆の関係が認められるが、これは、締め固め度合よりも、硬度指数の大きい区で生育が著しく良好のため、雨滴衝撃力緩和作用および表面流下水の流速の低下等が、大きく影響したものと考えられる。なお、Fig. 5では、草丈の平均値で示しているために、硬度指数20mm区と25mm区とでは、生長曲線は同じであるが、実際には、25mm区に草丈のバラツキが認められる。それゆえ、バラツキ区は、比較的均一区に比べ、雨滴の乱される度合が大きくなって、雨滴衝撃力が小さくなるために、従来同様⁶⁾、かなりの抑止効果を示し、Fig. 6のように25mm区の土砂流出量が少なかったものと考えられる。K-31-F区の場合、3区とも最終的には、生育量がほとんど同じに達するため、生育の効果よりも、締め固めの影響が大きくあらわれ、裸地区と同様の傾向を示したものと推測される。

赤土区とマサ土区との土砂流出量は、裸地区、K-31-F区およびヨモギ区ともに、赤土区の方が多くなってい

る。これは、赤土はマサ土に比べ、土壤孔隙が少なく、Fig. 1の粒径加積曲線から明らかなように、小さな土粒子が多く、平均粒径および中央粒径も小さい。しかも、赤土の粘土含有率は、マサ土の約10倍である。このため、赤土は、マサ土に比べて、表面土粒子の侵食抵抗力が弱いものと考えられる。しかし、降雨条件その他のいろいろな因子の影響も考えられるのは当然である。

3) 流出土砂の粒径分布

すでに述べた通り、測定期間中、33回の降雨があり、その内18回に土砂流出が認められた。しかし、粒度試験をおこなうに十分な土砂流出量がえられたのは、裸地区の、No. 4, No. 8, No. 11およびNo. 14の、計4回の降雨についてであった。この粒度試験結果をFig. 7に示す。

赤土区(3区)の粒径加積曲線をみると、No. 4, No. 8およびNo. 14の3回の降雨においては、ほぼ類似していて、粒径0.07mm付近で曲線が急激に変化している。これに対し、No. 11の降雨による流出土砂だけが、供試土壌の粒径加積曲線と同じようなカーブを描いている。この4回の降雨の10分間最大降雨量は、No. 4, 6.5mm, No. 8, 10.0mm, No. 11, 17.0mmおよびNo. 14, 11.5mmであるから、10分間最大降雨量が11.5mmまでの降雨強度に対しては、流出土砂の80%以上が粒径0.07mm以下の粒子で占められており、選択的に侵食を受けたものと考えられ

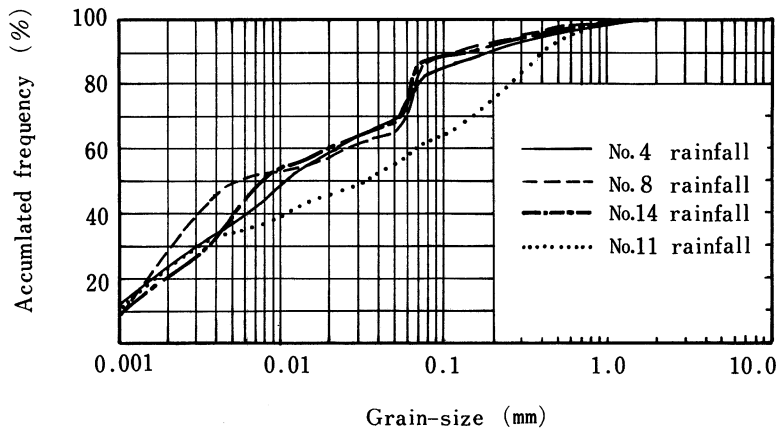


Fig. 7-1 The grain-size accumulation curve of sediment (No. 3-plot)

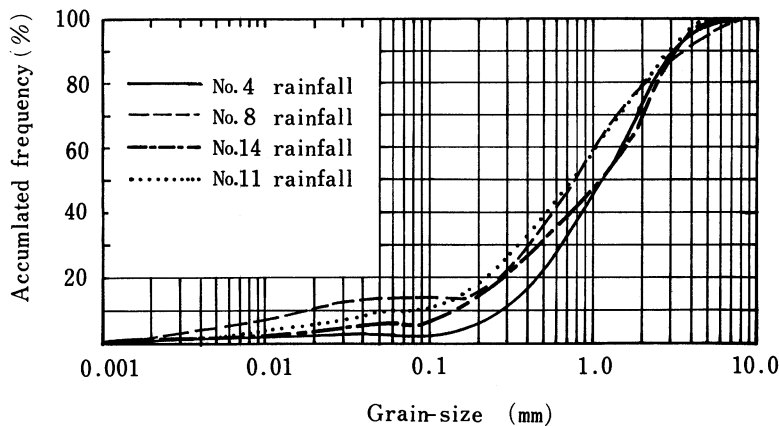


Fig. 7-2 The grain-size accumulation curve of sediment (No. 5-plot)

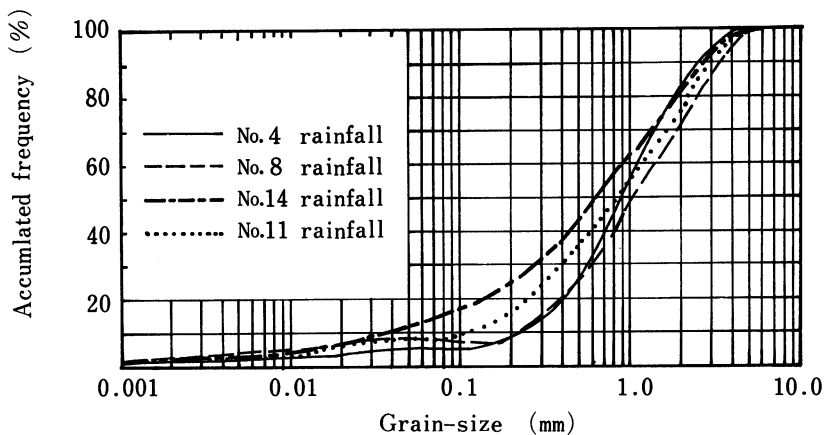


Fig. 7-3 The grain-size accumulation curve of sediment
(No. 9-plot)

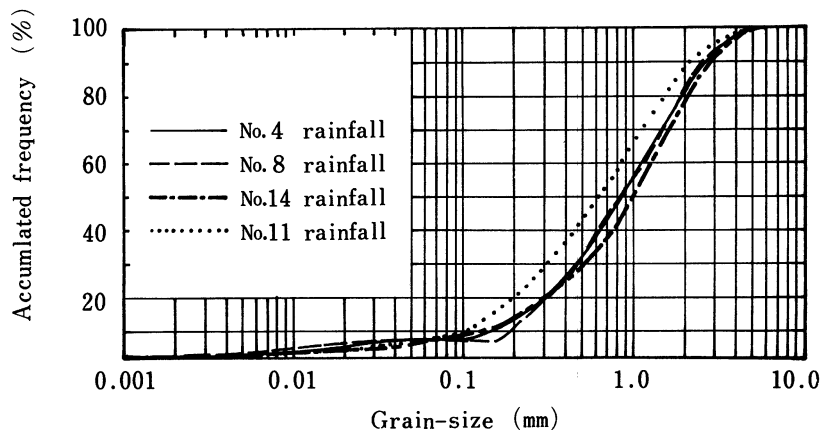


Fig. 7-4 The grain-size accumulation curve of sediment
(No. 12-plot)

る。また、10 分間最大降雨量が、17.0mm の場合、流出土砂の粒径加積曲線が供試土壌の粒径加積曲線と同様なカーブを描いているのは、斜面構成粒径分布に対して、全体的に、土砂流出がおこなわれたことを意味するものであろう。

マサ土区（5 区、9 区および 12 区）では、10 分間最大降雨量 6.5mm および 10.0mm の降雨強度に対しては、粒径加積曲線の粒径 0.2mm 付近から、急勾配で直線的に上昇している。しかし、10 分間最大降雨量 17.0mm では、粒径 0.1mm あるいはそれ以下のところから、いく分緩勾配で上昇し、11.5mm の場合、12 区は若干異なるけれども、5 区および 9 区では、その中間的な値を示している。これは、降雨強度が大きくなれば、それまで流出しえなかった大きな粒子が流出するため、その周辺の小さな粒子も安定を失って、流出するものと考えられる。いずれにせよ、流出土砂の粒径分布には、降雨強度が大きく影響を及ぼしていることは確かであろう。

4) のり面表面土砂の粒径分布

1977 年 7 月 13 日と 12 月 12 日とに、のり面表面を接写撮影し、表面土壌粒子の粒径分布を写真上で計測した。その中央粒径および標準偏差については、Table 4 に示すようである。

赤土区（3 区）の場合、のり面表面の斜面全体で、時間の経過に伴って中央粒径が小さくなっている。これは、のり面表面にある小さな土塊が、雨滴によって飛散・破壊され、土の微細粒子が表面流水によって凝集力を増して、流出しにくくなり、斜面上に留まるため、比較的大きな粒子が流亡するためと考えられる。しかし、土砂が小さな

土塊の状態のまま流出するのか、あるいは分解されてから流出するのか、判然としないために、どちらが主要因であるかは、現時点ではわからない。しかし、標準偏差も中央粒径同様、小さくなる傾向を示し、のり面表面の粒径が均一に近づいていく様子がうかがえる。

マサ土（5区）の場合、中央粒径は大きくなる傾向が認められる。これは、赤土のように、小さな土塊となることが少なく、表面流下水による土粒子間の凝集力が赤土ほど大きくないために、表面流下水によって、小さな粒子が主に流出したためだと考えられる。しかし、5区のR3点では、著しく中央粒径が小さくなっている。これは、のり

Table 4 The median diameter and the standard deviation of sediment grain-size on the banking slope surface

Photographing point (site)	Photographing date (1977)	Median diameter mm	Standard deviation
3L1	July 13	0.90	2.00
	Dec. 12	0.57	1.63
3L2	July 13	0.76	1.83
	Dec. 12	0.67	1.42
3L3	July 13	0.74	2.10
	Dec. 12	0.47	2.35
3L4	July 13	0.88	2.35
	Dec. 12	0.41	2.23
3R1	July 13	1.12	1.99
	Dec. 12	0.62	1.53
3R2	July 13	0.86	1.78
	Dec. 12	0.54	1.83
3R3	July 13	0.58	2.11
	Dec. 12	0.57	1.74
3R4	July 13	0.67	2.31
	Dec. 12	0.47	2.32
5L1	July 13	1.08	2.08
	Dec. 12	1.70	1.93
5L2	July 13	1.03	1.89
	Dec. 12	1.60	1.78
5L3	July 13	1.00	2.29
	Dec. 12	1.20	1.90
5L4	July 13	1.00	1.94
	Dec. 12	1.95	1.93
5R1	July 13	1.02	1.89
	Dec. 12	2.10	1.93
5R2	July 13	1.13	2.15
	Dec. 12	1.42	1.69
5R3	July 13	1.87	1.71
	Dec. 12	1.30	1.62
5R4	July 13	1.85	1.80
	Dec. 12	1.80	1.98

面上流端部から流出した比較的小さな粒径の土砂が、この付近に堆積したためだと考えられる。標準偏差は、のり面上流端部において、土砂の供給がないために、小さくなり、粒径は均一化していく傾向にある。のり面下流端部では、上流端部から供給される土砂の堆積の仕方によっては、逆の場合も起りうるので、一概に論ずることはできない。

写真によるのり面表面粒子の粒径分布と、流出土砂の粒度試験による粒径分布とを比較してみると、中央粒径および標準偏差ともに、一致した傾向は、ほとんど認められない。これは、写真によって判読できる粒子の大きさには、限界があり、今回の場合、粒径約0.2mm以下の粒子は、計測できなかったためだろうと考えられる。さらに、土砂がのり面にあるときは、特に、赤土の場合、小さな土塊となっており、その粒径を写真を用いて計測しているのに対し、流出土砂の粒度試験では、個々の土粒子をよく分散させた状態でおこなっているため、厳密な比較検討を十分おこなえなかった。

5) 表面流下水量

表面流下水も土砂流出量同様、測定期間中、18回認められた。各区間の表面流下水量の比較のためにおこなった分散分析結果をTable 5に、表面流下水量と土壌の締め固めとの関係を、Fig. 8に示す。

総表面流下水量は、締め固め度合いが同じ場合、植生工区の表面流下水量は、裸地区に対し、赤土面で、ヨモギ区およびK-31-F区ともに、65%前後、マサ土面で、ヨモギ区43.5%~73.0%ならびにK-31-F区64.1%~87.5%

Table 5 Analysis of variance of the surface runoff depth in each plot

plot No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		0.07	1.58***	1.16**	0.15	0.91	1.03*	0.44	0.92	1.54***	0.78	2.02***
2			1.50**	1.23**	0.23	0.98*	0.96	0.36	0.84	1.62***	0.86	1.94***
3				2.74***	1.73***	2.49***	0.54	1.13*	0.65	3.12***	2.36***	0.44
4					1.00*	0.25	2.19***	1.60***	2.08***	0.38	0.37	3.18***
5						0.75	1.19**	0.59	1.08	1.39**	0.63	2.18***
6							1.94***	1.35**	1.83***	0.63	0.12	2.93***
7								0.59	0.11	2.58***	1.82***	0.98*
8									0.48	1.98***	1.22**	1.58***
9										2.47***	1.71***	1.10*
10											0.75	3.57***
11												2.81***
12												

* Significance at the 10% level

** Significance at the 5% level

*** Significance at the 1% level

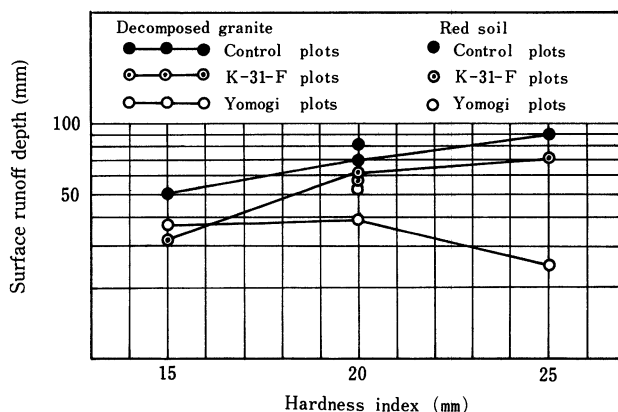


Fig. 8 The relation between the surface runoff depth and the soil hardness based on compaction

であり、植生によるかなりの抑制効果が認められる。

さらに、植生の種類の相違では、総量で比較した場合、7区と10区および8区と11区との間に5%～1%レベルの有意差が認められた。1降雨ごとでも、No. 15の1区と2区との間に10%レベルで、No. 9, No. 13およびNo. 15の7区と10区との間に5%～1%レベルで、No. 13およびNo. 15の8区と11区との間に1%レベルの有意差が、それぞれ認められた。

マサ土と赤土とは、総量では、有意な差は認められないが、1降雨ごとに比較すると、No. 13の2区と8区との間に1%レベルで、No. 15の1区と11区および3区と9区との間に5%～1%レベルの有意差が、それぞれ認められた。

締め固めの相違では、総量で、4区と7区、4区と8区、5区と12区および9区と12区との間に10%～1%レベルの有意差が認められた。1降雨ごとでは、No. 9, No. 13およびNo. 15の4区と7区との間に5%～1%レベルで、No. 13およびNo. 15の4区と8区との間に5%～1%レベルで、No. 13の5区と9区との間に5%レベルで、No. 8, No. 9およびNo. 15の5区と12区との間に10%～1%レベルで、No. 15の9区と12区との間に5%レベルで、それぞれ有意差が認められた。

ここでも、表面流下水量には、「植生の種類の相違」、「土壌の種類の相違」および「土壌の締め固めの相違」の3要素中、締め固めの相違の影響が大きいようである。Fig. 8から明らかなように、裸地区とK-31-F区とは、締め固め度合の増大に伴って、表面流下水量が増加している。これは、土砂流出量と同様、土壌孔隙の差に起因するものと考えられる。また、ヨモギ区の場合、土砂流出量と同じような傾向を示しているが、これも、硬度指数の大きい区で、生育が著しく良好であることが、大きく影響したものと考えられる。しかし、硬度指数20mm区の表面流下水量がやや多いが、これは、比較的草丈が均一であるため、バラツキ区(25mm)に比べ、枝葉に付着した雨水がのり面に落下しやすく、しかも、表面流下速度もあまり低下しなかったため、やや増加したものと考えられる。

次に、赤土区とマサ土区における表面流下水量は、裸地区とヨモギ区とでは、ともに赤土区が多くなっている。しかし、K-31-F区では、逆に、赤土区の方が少なくなっている。これは、赤土区でのK-31-Fの初期生長がマサ土区に比べ、若干劣るために、草丈にバラツキが認められたが、この生育量差の影響と考えられる。すなわち、葉に付着した雨水がのり面に分散落下しやすくなり、そのために、赤土区では、表面流下水量が減少したものと考えられる。

6) 浸透流出水量

実験開始から12月末までの期間で、5回、全試験区の浸透流出水がほとんど0になったので、全期間をV期に区分して検討した。各区間の浸透流出水量の比較のためにおこなった分散分析結果をTable 6に、浸透流出水量と土壌の締め固めとの関係をFig. 9に示す。

植生の種類の相違では、4区と7区との間に5%レベルの有意差が認められる。マサ土と赤土の相違では、有意な

Table 6 Analysis of variance of the infiltration water depth in each plot

plot No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		7.50	14.85**	12.27**	17.53***	1.09	2.06	6.09	14.58**	2.62	3.82	12.20**
	2		7.35	4.76	10.02	8.60	5.44	3.36	7.08	10.12	11.32*	4.70
		3		2.58	2.67	15.95**	12.79**	10.70*	0.27	17.48***	18.67***	2.64
			4		5.26	13.36**	10.21*	8.12	2.31	14.89**	16.09**	0.06
				5		18.63***	15.47**	13.38**	2.94	20.15***	21.35***	5.32
					6		3.15	5.24	15.68**	1.52	2.72	13.30**
						7		2.08	12.52**	4.68	5.88	10.14*
							8		10.44*	6.76	7.96	8.06
								9		17.21***	18.40***	2.37
									10		1.19	14.83**
										11		16.03**
											12	

* Significance at the 10% level
 ** Significance at the 5% level
 *** Significance at the 1% level

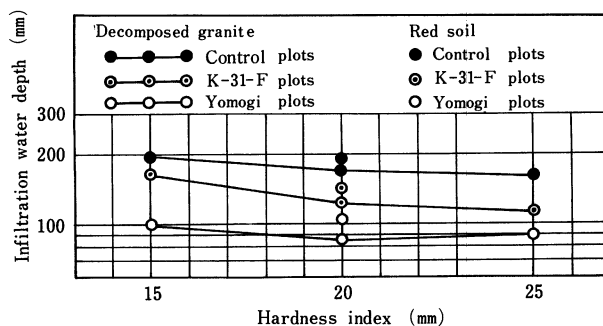


Fig. 9 The relation between the infiltration water depth and the soil hardness based on compaction

差は認められない。土壌の締め固めの相違では、4区と7区との間に10%レベルの有意差が認められる。Fig. 9から明らかなように、裸地区およびK-31-F区は、締め固め度合の増大に伴って、浸透流出水量が減少している。これは、締め固めにより、土壌孔隙率が小さくなり、透水性が低下するためだと考えられる。ヨモギ区の場合、硬度指数25mm区で増したのは、生育量差によるものと考えられる。すなわち、硬度指数20mm区に比べ、草丈にバラツキが認められるために、枝葉に付着した雨水が、のり面に分散落下し、しかも、のり面表面の表面流下速度が著しく低下したため、浸透量が増加したものと考えられる。

赤土区は、マサ土区に比べ、裸地区、ヨモギ区およびK-31-F区ともに、浸透流出水量が多い。これは、マサ土に比較すると、土壌孔隙が少ないために、土壌内貯留ができないためであろう。

7) 蒸発散量

このライシメーターによる雨水収支は、次式のように考えられる。

$$P = R + S + T \pm \Delta W \dots\dots\dots(1)$$

ここに、P: 降雨量 (mm) R: 表面流下水量 (mm) S: 浸透流出水量 (mm) T: 蒸発散量 (mm)

ΔW : 土壌水分 (mm)

(1)式から

$$T \pm \Delta W = P - R - S \dots\dots\dots(2)$$

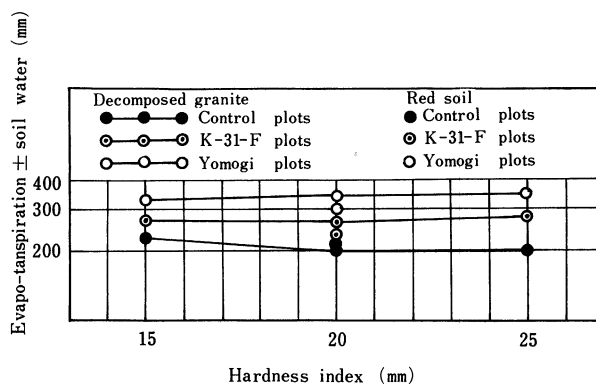


Fig. 10 The relation between the evapo-transpiration ± soil water and the soil hardness based on compaction

(2)式から、各区の $T \pm \Delta W$ を求め、土壌の締め固めとの関係で示したのが、Fig. 10 である。裸地区では、締め固め度合の増大に伴って $T \pm \Delta W$ が減少するが、ヨモギ区およびK-31-F区は、ほとんど変らない。また、締め固め度合が一定の場合、いずれも、ヨモギ区の $T \pm \Delta W$ が多い。

ここで、実験開始直後および12月末の浸透流出水量が、ほとんど0に近かったことから、 $T \pm \Delta W$ の内、 ΔW は同じと考え、無視すれば、この数値をそのまま、蒸発散量と考えることができる。蒸発散量は、赤土区とマサ土区とでは、マサ土区の方が若干多く、裸地区で降雨量の50%前後、K-31-F区で60%前後およびヨモギ区で70%～75%である。同じ草本類でも、その生理・生態的特性および生長の相違によって、かなり差が現われている。

8) 土砂流出量実験式

植生の効果を定量的に表示するためには、まず、比較対象となる裸地区の土砂流出量を、簡単に測定できる因子をもとに、定量的に把握することが先決である。前報⁷⁾では、マサ土のり面の裸地区における土砂流出量と総降雨量、1時間最大降雨量および10分間最大降雨量等との関連を調査し、土砂流出量と10分間最大降雨量との間に、非常に高い相関関係が認められ、しかも、土砂流出量は、10分間最大降雨量の約2乗に比例していることを明らかにした。また、10分間最大降雨量は、雨滴侵食におよぼす支配的因子であると考えられることも報告した。今回も、赤土とマサ土との裸地区において、土砂流出量と10分間最大降雨量との間には、今まで同様、降雨因子中、最も高い相関関係が認められた。その関係をFig. 11に示すが、土砂流出量は、土壌の種類および土壌の締め固めの相違に関係な

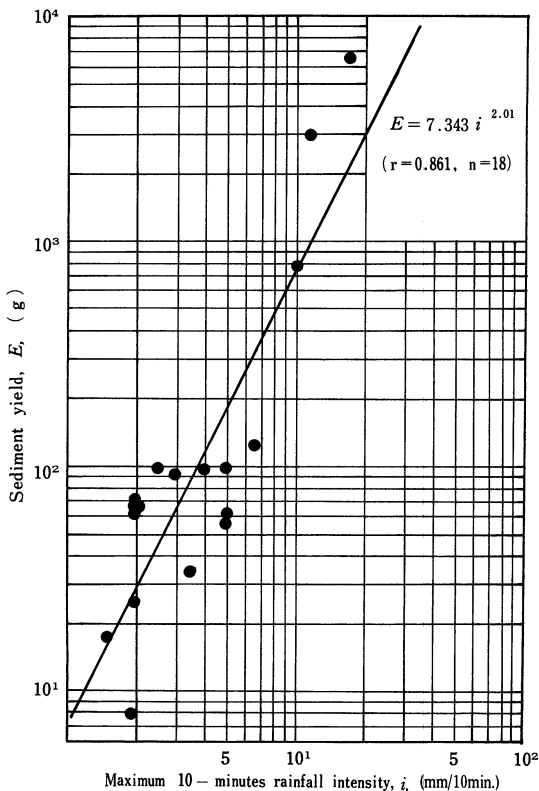


Fig. 11-1 The relation between the sediment yield and the maximum 10-minutes rainfall intensity in No. 3-plot (control plot)

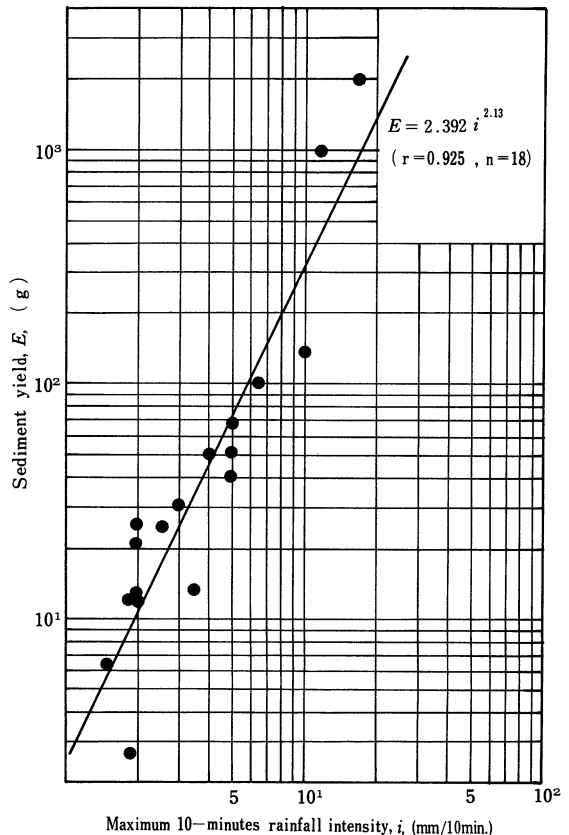


Fig. 11-2 The relation between the sediment yield and the maximum 10-minutes rainfall intensity in No. 5-plot (control plot)

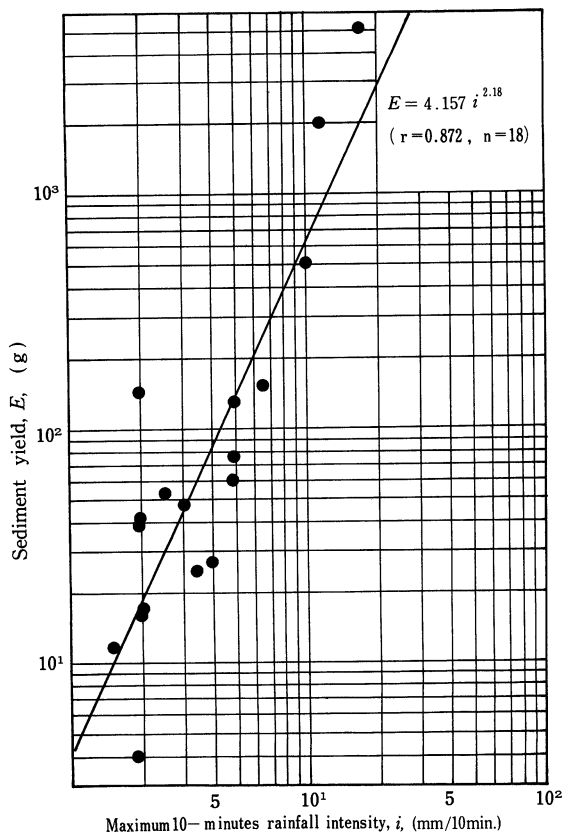


Fig. 11-3 The relation between the sediment yield and the maximum 10-minutes rainfall intensity in No. 9-plot (control plot)

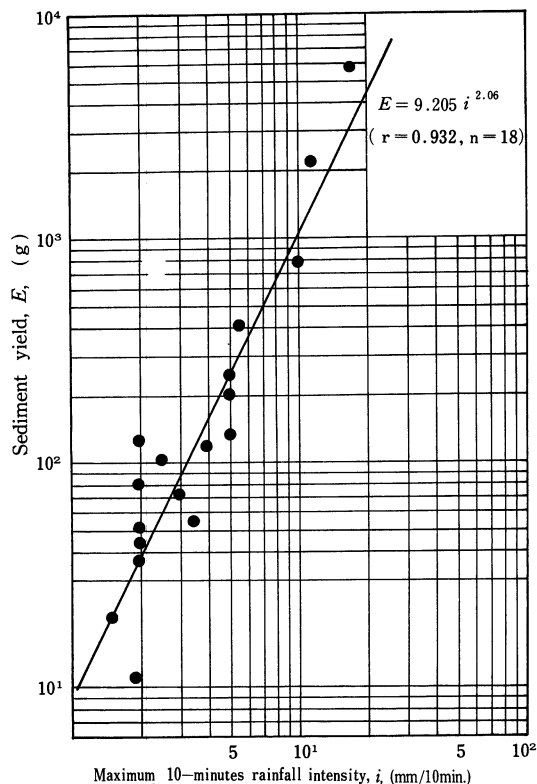


Fig. 11-4 The relation between the sediment yield and the maximum 10-minutes rainfall intensity in No. 12-plot (control plot)

く、10 分間最大降雨量の約 2 乗に比例しているとみなされる。

そこで、土砂流出量を、10 分間最大降雨量との関連で表示するために、斜面長および勾配が一定の場合、単位面積あたりの土砂流出量 $E(\text{gr/cm}^2)$ は、土の密度 $\sigma(\text{gr/cm}^3)$ 、流出土砂の粒径 $d(\text{cm})$ 、10 分間最大降雨量 $i(\text{cm/sec.})$ の 2 乗および重力の加速度 $g(\text{cm/sec.}^2)$ の関数で表わされると考えた。すなわち、

$$E = f(\sigma \cdot d \cdot i^2 \cdot g) \dots \dots \dots (3)$$

(3) 式の関係を次元解析により、無次元表示し、次のように表わす。

$$\frac{E}{\sigma \cdot d} = A \left(\frac{i^2}{g \cdot d} \right)^B - C \dots \dots \dots (4)$$

A, B および C は定数

(4) 式において、 d は d_{50} (中央粒径) を用い、これまでの測定結果を整理して、定数 A, B および C を求めると、次のようである。

$$\frac{E}{\sigma \cdot d_{50}} = 10^{0.59} \left(\frac{i^2}{g \cdot d_{50}} \right) - 0.043 \dots \dots \dots (5)$$

(相関係数 $r = 0.964$)

(5) 式の関係を図示したのが、Fig. 12 である。流出土砂の中央粒径の計測が、土砂が少ないために、すでに述べた通り、18 回中、4 回しかできず、資料は少ないが、一定の傾向はうかがわれる。

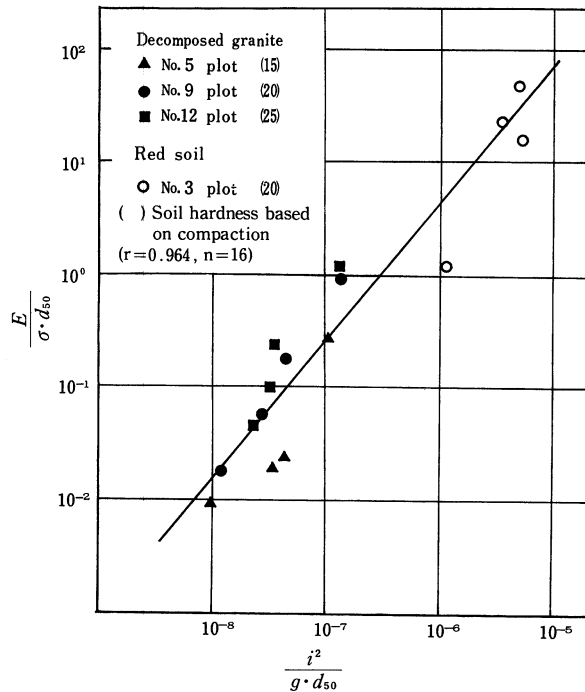


Fig. 12 Non-dimensional expressions of sediment yield

この実験式の特徴は、Kalinske および Brown の提案した掃流土砂量の式を基本に導いた実験式⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾の考え方とは異なり、実際の盛土に使用されるマサ土および赤土を用いて、現実の盛土のり面とほとんど変わらない状態で、自然降雨による実験をおこない、土砂流出量を降雨強度との関連で、定量的に表示した点にある。

なお、(4)式において、 $E=0$ とおいたときの i の値が“土砂流出限界降雨強度”と考えられる。

今後、盛土斜面の土壌の種類および斜面勾配等の実験資料を増加していくと同時に、粒径および密度の測定方法を考慮すれば、(4)式は、普遍性のある一般式となりうる可能性が十分にある。さらに、愛媛大学米野々演習林の新試験地における測定資料によって、(4)式の関係を検討中である。

V お わ り に

植生のり面保護工を施工した場合の、植生の効果を定量的に表示する前段階として、盛土のり面の表面侵食について、ライシメーターを利用して、定量的な解析を試みている。これまでの詳細な測定結果を基に、土砂流出量を降雨強度との関連で、定量的に表示することのできる実験式を提案した。

今後、提案した実験式の適用性を究明するために、継続して現地実験をおこない、多くの資料を得て、検討を重ねていくつもりである。

引 用 文 献

- 1) 日本材料学会編：斜面安定工法。346pp, 鹿島出版会, 東京, 1974
- 2) 江崎次夫：土壌硬度を変化させた場合のヨモギおよびK-31-Fの生育について。(未発表)

- 3) 林業土木施設研究所編：林道の構造物とのり面安定工法．374pp，農林出版，東京，1972
- 4) 山寺喜成：緑化工法の適用基準に関する考察．日林講 **79**：345～346，1968
- 5) 岩垣雄一・土屋義人：水滴による地面浸食に関する二，三の実験．土木学会論文集 **35**：55～63，1956
- 6) 江崎次夫・伏見知道：日本産雑草類ののり面保護工に対する利用方法に関する研究 (II)．愛媛大演報 **13**：161～174，1976
- 7) 江崎次夫：日本産雑草類ののり面保護工に対する利用方法に関する研究 (IV)．日林九支論 **31**：299～300，1978
- 8) 岩垣雄一・土屋義人：雨水流による土砂の剝離と輸送について．土木学会論文集 **51**：34～40，1957
- 9) 土屋義人：地表面浸食に関する二，三の水理学的考察．土木学会論文集 **59**：32～38，1958
- 10) 吉岡昭三・木賀一美・小杉紘平・前田穂積：稲城砂の土質工学的性質と土工設計基準．土と基礎 **190**：23～29，1973
- 11) 新田伸三・小橋澄治：土工事ののり面保護工．272pp，鹿島出版会，東京，1976
- 12) Saburo Komura：Hydraulics of slope Erosion by Overland Flow. Journal of Hydraulics Division, ASCE, **102**：1573～1586, (Proc. paper 12489) 1976
- 13) 遠藤治郎：山腹土砂の移動およびその制御に関する研究．山形大学紀要（農学）**8** (1)：53～162，1978
- 14) 駒村富士弥：植生による斜面侵食および崩壊防止の効果．緑化工技術 **5** (2)：9～13，1978

(1978年8月31日 受理)