

人工降雨による斜面の土壌侵食実験
— 表面流出水量・降雨強度と土砂流亡量の関係 —

紙井 泰典¹・近森 邦英²・小椋 正澄¹

(¹農学部農林環境工学講座・²愛媛大学大学院連合農学研究科)

Experimental Studies on the Soil Erosion on a Slope Using
the Artificial Rainfall

— Relationship between Run-off, Rainfall Intensity and Soil Loss —

Yasunori KAMI¹, Kunihide CHIKAMORI², and Masazumi OGURA¹

¹ Chair of Land Environmental Engineering, Faculty of Agriculture,

² United Graduate School of Agricultural Sciences, Ehime University

Abstract: Soil erosion experiments were carried out at the artificial rainfall facility in Faculty of Agriculture, Kochi University campus to develop the formulae to estimate eroded soil loss. The soil chamber used was with a length of 1.8m, width of 20.5cm, height of 25cm. Soil was carried from Onozumi, Tosa-Shimizu City, Kochi Prefecture.

Following formulae were developed by regressional analysis. All experiments were conducted for four hours with constant rainfall intensity and the soil conditions which were analyzed here are saturated.

$$D = 0.0519 + 0.0389 Q$$

$$D = 0.0389 + 0.00334 RI$$

$$D = -0.0086 + 0.00379 Q + 0.0163 i$$

$$D = -0.0420 + 0.00333 RI + 0.0209 i$$

$$D = 0.0756 + 0.00402 Q \cdot \text{RATE}$$

$$D = 0.0582 + 0.00376 RI \cdot \text{RATE}$$

$$D = 0.0130 + 0.00327 Q + 0.0734 \text{RATE} + 0.0580 E$$

Between the accumulative soil loss and accumulative surface discharge and accumulative rainfall, following formulae were found.

$$D_{AC} = 0.0166 Q_{AC}^{0.8} \quad (\text{slope angle } 1.7^\circ, 3^\circ)$$

$$D_{AC} = 0.0260 Q_{AC}^{0.8} \quad (\text{slope angle } 3^\circ, 4^\circ)$$

$$D_{AC} = 0.0275 Q_{AC}^{0.8} \quad (\text{slope angle } 5^\circ, 6^\circ)$$

$$D_{AC} = 0.0123 R_{AC}^{0.8} \quad (\text{slope angle } 1.7^\circ, 3^\circ)$$

$$D_{AC} = 0.0163 R_{AC}^{0.8} \quad (\text{slope angle } 3^\circ, 4^\circ)$$

$$D_{AC} = 0.0244 R_{AC}^{0.8} \quad (\text{slope angle } 5^\circ, 6^\circ)$$

where, D: soil loss ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{hr}$), Q: run-off (mm/hr), RI: rainfall intensity (mm/hr), EK: rainfall kinetic energy ($\text{ft}\cdot\text{t}/\text{acre}\cdot\text{inch}$), RATE: run-off ratio, i : slope angle (degree), E: eroded soil amount calculated from the soil surface elevation (mm/hr), D_{AC} : accumulative soil loss through a set of experiments (kg/m^2), Q_{AC} : accumulative run-off discharge (mm), R_{AC} : accumulative rainfall (mm).

緒 言

農地開発に際して、施工時に注意しないと大量の土砂が流亡し、河川・内湾を汚染することがある。傾斜地の土壌侵食に関する研究における最大の困難は、現場の土質、土壌構造、土壌水分量、植物被覆、地形（傾斜、圃区の大きさ）、耕作の有無や耕作形態、排水路施設など、地形・土壌条件が多様であり、さらにそこに降る自然降雨の降雨量、降雨強度、降雨継続時間などもまちまちで、統一的な取扱いが難しいという点にある。そこで、土性の分かっている土壌を用い、降雨強度・継続時間が自由に換えられる人工降雨を用いて実験することが、研究手法として重要となってくる。ここでは開発直後の裸地状態の傾斜地からの土壌流亡量と流出水量・降雨強度・斜面勾配等との関係を明かにすることを目的として、人工降雨による土壌侵食実験を行うこととした。

実験方法

1. 実験土と土槽

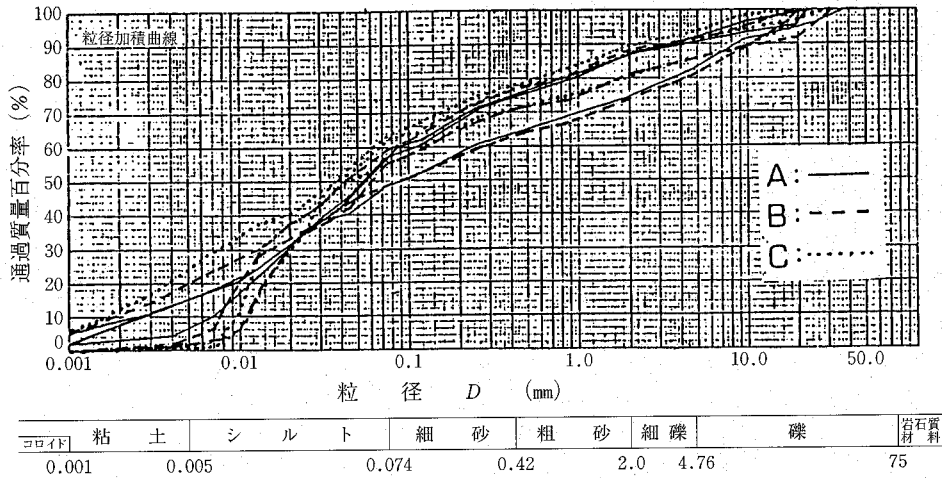
実験土は高知県土佐清水市の西部、国営農地開発高知西南開拓建設事業斧積地区の造成直後の表層土である（位置については第1図参照）。実験土は斧積に設置した流出試験圃場（幅2m、長さ20m、A:5°、B:3°、C:1.7°の3圃場があった）と同じ圃場内から採取した。実験に先立ち、現地土壌の密度 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 、含水比21.3%（「株相愛」の1987年の報告書による）となるように、モールドを用いた突き固め試験を行った。現場試験圃場の粒度分布を第2図に示す。実験には農学部内の斜面崩壊実験室の人工降雨施設を用いた。実験は造成直後、まだ裸地状態のままの圃場からの土壌流亡に焦点を絞って実験を行うこととした。実験に用いた木製土槽は、幅20.5cm、長さ180cm、



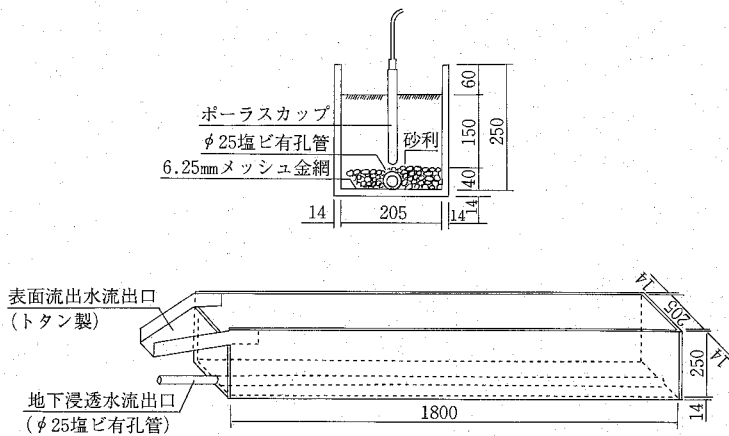
第1図 斧積地区位置図

深さ25cm, 底に地下排水用の塩ビ有孔管を布設, 0.6cmメッシュの金網を掛け, 粒径3-5cmと1-3cmの砂利層(厚さ5cm)の上に, 試料土10cm厚で2層に蒔き出し, 厚さ7.5cmになるまで突き固め, 現地土壌と同じ湿潤密度, 含水比となるようにした(第3図参照). 中央には深さ10cmにポラス・カップを埋め, 水銀マンオメーターで土壌水分張力を測定した.

表面流出水と流亡土砂は土層の上端からビニールの筒で土砂溜(プラスチック製の容器)に導き, 実験後メスシリンダーで流出水量を計測し, 土砂成分は1日たって沈降堆積したものの重量を計量し, 乾燥後フルイと比重瓶による土質実験の粒度分析の方法を用いて分析した. 地下浸透水量と地下からの流出土砂量は, 有孔管からの流出水土を, 表面流出水土とは別の土砂溜に導いて表面流出と同様に計量・分析した.



第2図 各圃場の粒度分布曲線



第3図 土砂流出実験土槽説明図

2. 実験の時期と回数

実験は3回に分けて行った。

第1回：昭和63年3月24日～4月5日。第2回：昭和63年7月16日～8月16日。

第3回：昭和63年12月16日～昭和64年11月7日

地表面勾配：第1回は1.7度（8回）及び3度（2回），第2回は5度（10回）及び6度（7回），第3回は3度（9回）及び4度（6回）

降雨強度：実験した人工降雨強度は次の8種類である。

8.9mm, 17.8mm, 26.7mm, 35.6mm, 44.5mm, 53.4mm, 71.2mm, 89.0mm

しかし、各回毎の実験降雨強度は、順序も回数もまちまちである。

降雨継続時間：各回とも同一降雨強度での実験は4時間継続した。降雨強度は流量をメーターによって測定し、実験終了後プラスチック容器に人工降雨を降らせて、流量計の読みと降雨量とをキャリブレーションして決定した。

なお、各回一連の実験が終了するまでは、途中で傾斜や降雨強度を変える度に土を詰め替えることはせず、前回に引き続いた状態で降雨を降らせた。この点については、一連の実験の各回の土壌状態が実験ごとに変化するので好ましくないとの考え方もあろうが、実際の斜面では降雨ごとに流亡土砂を補ったり、鋤返したりするのは、農地ではあるかもしれないが、裸地ではありえないことであり、より実際に近い状態で観察するという観点から連続して流亡させていくこととしたものである。ただし、勾配については実験の進行に伴って表層土が流出し、勾配がだんだん緩くなるので、土壌面の平均勾配が所定の勾配になるように、土槽全体としての勾配は毎回微調整した。次節で出てくる第2・3表の土槽勾配が土壌面勾配と違っているのはこのためである。

実験結果

1. 表面流出水量・降雨強度と流亡土砂量との関係

実験の結果を第1・2・3表に示す。

第1表 第1回実験結果 (1.7, 3度)

斜面勾配 (度)	実験 月日	降雨強度 (mm/hr)	降雨量 Volume (ℓ)	表面流出量 (ℓ)	流出率 (%)	地下水流出量 (ℓ)	表面流出土量 (g)	地下水流出土量 (g)	地下水流出率 (%)	土槽勾配 (度)	開始水分張力 (mmHg)	終了水分張力 (mmHg)	平均気温 (℃)	備考
1.7	3/24	8.9	13.131	2.294	17.47	0.67	35.706	1.311	5.10	1.7	25	18	13.6	
〃	3/25	17.8	26.261	17.07	65.00	2.66	193.174	5.782	10.13	〃	20	20	11.8	
〃	3/28	26.7	39.392	23.65	60.04	4.22	162.210	10.930	10.71	〃	23	26	14.7	
〃	3/29	35.6	52.522	35.13	66.89	3.43	134.547	3.809	6.53	〃	24	23	11.8	
〃	3/30	44.5	65.653	46.33	70.57	5.25	161.385	3.786	8.00	〃	17	17	10.3	
〃	3/31	53.4	78.784	53.62	68.06	7.03	207.540	9.970	8.92	〃	16	16	15.1	
〃	4/1	71.2	105.045	74.23	70.66	4.00	265.364	4.931	3.81	〃	16	15	12.8	
〃	4/2	89.0	131.306	95.50	72.73	8.82	315.246	5.384	6.72	〃	16	16	13.3	
3	4/4	8.9	13.118	7.00	53.36	0.94	9.291	0.392	7.17	3	21	16	15.7	
〃	4/5	17.8	26.237	17.38	66.24	4.16	103.872	21.487	15.86	〃	20	20	16.1	

第2表 第2回実験結果 (5, 6度)

斜面 勾配 (度)	実験 月日	降雨 強度 (mm/hr)	降雨量 Volume (ℓ)	表面 流出量 (ℓ)	流出率 (%)	地下水 流出量 (ℓ)	表面流 出土量 (g)	地下流 出土量 (g)	土壌面 侵食量 (cm ²)	土槽 勾配 (度)	開始水 分張力 (mmHg)	終了水 分張力 (mmHg)	平均 気温 (℃)	備 考
5	7/16	89.0	130.864	95.900	73.28	0.873	1794.392	17.179	2079.7	5.00	86	68	30.2	
6	7/20	17.8	26.096	20.310	77.83	0	280.918	0	1172.2	6.66	73	34	30.2	
5	7/21	17.8	26.137	29.000	110.95	1.440	198.209	欠	274.1	5.83	35	35	30.2	
〃	7/22	26.7	39.188	34.400	87.78	0.630	283.545	欠	313.0	6.07	35	33	28.7	
6	7/23	26.7	39.100	35.670	91.23	0	265.351	0	197.6	7.18	26	26	26.5	
5	8/2	35.6	52.225	47.600	91.14	0	281.165	0	128.7	6.33	162	142	29.9	
〃	8/3	35.6	52.211	44.760	85.73	0	226.535	0	267.6	6.47	102	81	29.6	
6	8/4	35.6	52.082	44.830	86.08	0	295.344	0	634.1	7.61	68	56	30.1	
5	8/5	44.5	65.230	57.900	88.76	0	384.857	0	145.9	6.72	31	29	29.8	
6	8/6	44.5	65.057	56.520	86.88	0	338.422	0	453.9	7.91	27	27	28.7	
5	8/7	53.4	78.231	70.670	90.34	1.200	371.189	欠	699.8	7.00	26	27	29.5	
6	8/8	53.4	77.996	67.810	86.94	1.500	392.331	欠	835.7	8.29	27	27	29.6	
5	8/9	71.2	104.186	87.830	84.30	7.700	438.573	欠	573.4	7.53	27	27	30.1	
6	8/10	71.2	103.848	81.200	78.19	4.730	392.524	欠	458.2	8.82	27	27	25.7	
5	8/11	89.0	130.059	97.000	74.58	12.600	487.734	欠	698.8	8.08	26	26	29.5	
6	8/12	89.0	129.607	100.400	77.46	4.900	480.029	10.569	962.0	9.38	25	25	27.5	
5	8/16	8.9	12.983	6.530	50.30	0	30.010	欠	44.7	8.78	32	28	30.2	

第3表 第3回実験結果 (3, 4度)

番 号	斜面 勾配 (度)	実験 月日	降雨 強度 (mm/hr)	降雨量 Volume (ℓ)	表面 流出量 (ℓ)	流出率 (%)	地下水 流出量 (ℓ)	表面流 出土量 (g)	地下流 出土量 (g)	土壌面 侵食量 (cm ²)	土壌 勾配 (度)	開始水 分張力 (mmHg)	終了水 分張力 (mmHg)	平均 気温 (℃)
①	3	12/14	8.9	13.118	3.740	28.51	0.100	121.211	0	627.3	3.00	284	275	14.3
②	4	12/15	8.9	13.097	3.000	22.91	0.000	54.703	0	-332.1	4.42	207	185	9.5
③	3	12/16	17.8	26.224	9.710	37.03	0.260	145.834	0	415.9	3.48	119	107	5.8
④	4	12/19	17.8	26.190	9.400	35.89	0	117.770	0	141.5	4.55	67	68	8.7
⑤	3	12/20	26.7	39.333	22.675	57.65	0	206.171	0	224.2	3.57	58	58	9.2
⑥	4	12/21	26.7	39.282	20.175	51.36	0	229.523	0	836.5	4.61	44	43	13.7
⑦	3	12/22	35.6	52.432	33.257	63.43	0	215.448	0	252.6	3.76	37	37	10.3
⑧	4	12/23	35.6	52.361	29.747	56.81	0	168.501	0	516.6	4.80	31	31	9.2
⑨	3	12/24	44.5	65.521	33.690	51.42	0	169.935	0	611.0	4.01	28	28	9.6
⑩	4	12/26	44.5	65.423	38.120	58.27	0	228.715	0	694.5	5.09	33	31	10.5
⑪	3	12/27	44.5	65.498	55.300	84.43	0	293.910	0	512.2	4.29	28	28	8.3
⑫	3	12/28	53.4	78.577	68.625	87.33	0	294.183	0	452.6	4.48	27	27	8.6
⑬	4	12/29	53.4	78.434	68.860	87.79	0.900	354.063	1.992	631.5	5.66	27	27	8.5
⑭	3	12/30	71.2	104.699	95.885	91.58	1.870	522.178	3.505	105.0	4.95	27	27	12.7
⑮	4	1/4	71.2	104.496	90.562	86.67	1.730	500.406	1.826	799.2	6.10	47	30	9.4
⑯	3	1/5	89.0	130.777	136.300	104.22	6.410	551.324	4.507	699.6	5.42	27	27	9.8
⑰	4	1/6	89.0	130.502	124.400	95.32	3.000	592.122	2.507	963.5	6.57	27	27	9.0
⑱	3	1/7	35.6	52.264	51.430	98.4	2.631	202.900	0.901	456.8	5.93	27	27	12.5

記号の説明 用いた記号は次のとおり。

D : 単一実験の表面流出土量 (kg/m²/hr)

Q : 〃 表面流出水量 (mm/hr),

実験は4時間で行ったが、この間の流出水量を4で割って1時間当たりとしている。

- RI : \times 降雨強度 (mm/hr)
- EK : \times 降雨の運動エネルギー (ft \cdot t/acre \cdot inch)
Wischmeier, Smith の式による, $EK = 916 + 331 \log_{10} I$
- I : \times 降雨強度 (inch/hr). なお, EK, I 及び後述の I_{30} は SI 単位に換算する必要があるが, 元の USLE 式の係数と比較する上では元の単位で示すのが便利と考え ft 単位のままの値で計算した.
- I_{30} : \times 一雨の最大30分間降雨強度 (inch/30min)
- RATE: \times 表面流出率 (= Q/RI, 無次元)
- QU : \times 地下流出水量 (mm/hr)
- S : \times USLE 式における斜面勾配係数. 勾配を g (%) とすると S は,
 $S = (0.64g^2 + 4.52g + 6.48)/100$.
- i : \times 斜面勾配 (度)
- E : \times 前回降雨実験のときの土壌表面の高さと今回の実験後の高さの差から計算した1回降雨による地表面侵食量 (mm/hr). 高さは土壌面から土槽上端までの距離を20cm間隔で断面の左右両端でメジャーで測って平均し, volume 換算して, 土壌表面積で割って求めた.

2. 粒度試験の結果

実験後の土槽残留土の粒径分布を第4表に, 3° , 4° の表面流出土の粒径分布を第5・6表に示す.

第4表 土槽内残留土の粒径分布

(単位 %)

番号	厚別	0~ 0.001mm	0.001~ 0.005mm	0.074~ 0.005mm	0.42~ 0.074mm	2.00~ 0.42mm
1	表層	2.69	3.48	38.07	19.93	19.68
	中上層	7.60	15.66	41.03	11.40	9.11
	中下層	11.68	27.54	37.84	12.95	8.07
	下層	11.51	26.85	36.36	13.61	8.13
2	表層	2.05	4.56	35.81	18.50	17.46
	中下層	11.45	28.57	43.79	11.37	9.45
	下層	12.46	21.89	40.46	12.76	8.67
3	表層	10.37	23.92	33.61	13.17	11.71
	中下層	8.06	26.45	35.34	12.61	7.85
	下層	9.45	25.73	25.85	13.97	9.57
4	表層	11.95	24.31	38.03	14.22	10.17
	下層	11.65	29.80	35.67	12.60	7.54
5	表層	14.07	28.61	37.23	14.15	10.27
	下層	11.01	23.34	37.29	11.51	8.04
6	表層	12.84	24.81	36.05	13.03	8.15
	下層	8.98	24.63	36.94	13.41	8.69
7	表層	10.22	24.87	32.14	15.36	10.76
	下層	7.82	26.81	37.70	12.75	8.63
8	表層	10.05	23.87	39.96	12.10	10.91
	下層	12.33	25.10	34.23	12.52	8.31
9	表層	6.47	21.97	32.72	11.84	9.38
	下層	12.49	25.50	31.08	11.41	20.52
表層	平均値	8.968	20.044	35.958	14.700	12.054
	標準誤差	4.303	9.254	2.669	2.802	3.867
下層	平均値	10.856	25.517	35.064	12.727	9.789
	標準誤差	1.703	2.255	4.302	0.871	4.063

第5表 3度の土壤面勾配の流亡土砂の粒径分布 (%)

斜面勾配 (度)	番号	雨量強度 (mm/hr)	0~ 0.001mm	0~ 0.005mm	0.074~ 0.005mm	0.42~ 0.074mm	2.00~ 0.42mm
3	①	8.9	18.02	51.74	44.38	2.54	0.28
	③	17.8	18.77	49.48	49.44	0.99	0.09
	⑤	26.7	12.60	39.81	57.31	2.67	0.21
	⑦	35.6	11.03	40.23	57.30	2.30	0.17
	⑨	44.5	9.45	36.44	59.08	2.21	1.36
	⑪	44.5	11.60	39.32	57.77	2.65	0.23
	⑫	53.4	10.41	36.46	60.42	2.03	0.55
	⑭	71.2	7.69	31.82	60.76	6.69	0.57
	⑯	89.0	13.17	35.11	60.08	4.44	0.28
	⑰	35.6	15.40	48.13	46.23	2.99	2.39
	平均値		12.814	40.854	55.277	2.951	0.613
	標準誤差		3.612	6.692	6.175	1.571	0.724

第6表 4度の土壤面勾配の流亡土砂の粒径分布 (%)

斜面勾配 (度)	番号	雨量強度 (mm/hr)	0~ 0.001mm	0~ 0.005mm	0.074~ 0.005mm	0.42~ 0.074mm	2.00~ 0.42mm
4	②	8.9	16.31	42.23	57.13	0.58	0.06
	④	17.8	15.64	44.63	53.55	1.70	0.12
	⑥	26.7	14.12	39.11	51.17	7.05	2.42
	⑧	35.6	13.91	39.58	52.72	4.40	2.32
	⑩	44.5	12.76	43.49	54.76	1.35	0.40
	⑬	53.4	11.53	42.77	54.95	1.42	0.86
	⑮	71.2	11.24	34.47	57.84	6.68	0.67
	⑰	89.0	11.72	40.94	54.32	3.20	1.29
		平均値		13.404	40.903	54.555	3.298
	標準誤差		1.915	3.211	2.188	2.507	0.925

3. 雨滴の質量

人工降雨施設の散水口から、実験度槽の土壌表面までの高さは7m、散水口からの雨滴を一定時間雨滴の数を数えつつ容器に受けて計量した結果の雨滴の重量と体積は第7表のとおりであった。

第7表 雨滴の重量と体積

降雨強度	重量(10 ⁻³ kg)	気温(℃)	密度(g/cm ³)	体積(cm ³)
10mm	0.02238	9.2	0.99981	0.02238
30mm	0.02212	12.2	0.99950	0.02213
40mm	0.02201	9.5	0.99977	0.02202
50mm	0.02335	8.0	0.99988	0.02335
60mm	0.02336	8.8	0.99983	0.02337
80mm	0.02396	12.2	0.99950	0.02397
平均	0.02286	10.0	0.99972	0.02287

考 察

(1) 第1・2・3表の考察

第1表の流出率をみると、3月24日の最初の実験を除いて、流出率が60%を越えている。24日の本実験に先立つ予備実験を行ったとき、土壌が水分で飽和されていたためと思われる。ここで、各実験時の表面流出水量と地下水流出水量の和が降雨量に一致しないのは、土槽の幅が狭いため、降雨が地表との衝突後飛散して土槽の外に飛び散る水分の割合が大きいためである。3月25日の実験において流出土砂量が急増しているが、表面流出水量も急増しており、両者は関係があると考えられる。同じ17.8mm/hrでも3月25日の実験と4月5日のものでは表面流出水量、勾配はほぼ同じ位でも表面流出土量は前者が圧倒的に多い。降雨強度の大きい雨の後では土壌侵食量が減少する傾向があるものと考えられる。

地下水流出率は必ずしも降雨量・降雨強度に比例してはいない。毎日のようにかなり強度の大きな雨に土壌表面が叩かれて、細粒土による目詰まりなど、地下への浸透性が低下したのと考えられる。4月5日の実験では前日から引き続いての実験であり、降雨強度も大きくはないにも関わらず、地下水流出率は上昇している。勾配1.7度から3度が変わって、地下への流出経路が変化したのかも知れない。

第2表を見ると、第1回目の7月16日の実験で、強度89mm/hrの雨を降らせたため、非常に大きな表面流出土量となっている。地層内が水分によって飽和されていない状態での強度の大きな降雨は、極めて大きな土壌流亡を招くと考えられる。7月20、21日と小さな降雨強度にしたため流亡土砂量が漸減したが、8月4日以降は、降雨強度の増大に伴って土砂流亡量も増加している。全般に地下水流出水量が少ないのは、最初に強度の大きな雨を降らせたため地表面が目詰まりを起こして浸透性が低下したとも考えられるが、次の第3表の結果と併せて考えると、土壌層の形成時（特に突き固めなど）に問題があった可能性もある。それでも53.4mm/hr以上では徐々に地下浸透量が多くなっている。7月21日の表面流出水量が100%を越えたのは、実験時の流量変動や測定の誤差と思われる。

7月23日から8月2日まで、間隔があき、8月2日の実験開始時の水分張力が大きくなったが、表面流出水量や土壌流亡量などの流出機構にそれ以前と比べて大きな変化は見られない。

第3表を見ると、表面流出水量は12月20日の降雨強度26.7mm/hrあたりから増えている。表面流出土量は最初がやや大きいのが、後はだいたい降雨強度の増加に従って増えている。第2表とは違って、最初に大強度の雨を降らせるようなことはしなかったが、地下水流出水量は小さかった。降らせた雨のほとんどが流出または飛散したということになる。第1表のときには勾配3度のときにも地下水流出があったことと考え合わせると、最初に浸透水の水ミチが形成されるかどうかで地下水浸透の差異をもたらすと考えられるが、あるいはほとんど同じ条件で土槽を作ったのであるが、2度目、3度目は突き固め・転圧がどこか1度目と違ってしまい、地下浸透しにくい条件が形成されてしまったとも考えられる。12月29日以降は降雨強度の強弱に関わらず地下水流出があるのは、重なる実験によって、水ミチが形成されたのではないと思われる。

次に土砂流亡量などを目的変数とする回帰分析の結果を述べる。

(2) 要素間の回帰の決定係数

第1～3表の各要素間の単回帰の決定係数を第8表に示す。

第 8 表 因子間の単回帰分析の決定係数 (r^2)

因子	Q	RI	EK·I ₃₀	EK	RATE	D	S	i
Q	—	1.000	1.000	1.000	0.970	0.999	0.910	0.857
RI	0.925	—	1.000	1.000	0.965	0.998	0.902	0.847
EK·I ₃₀	0.923	0.997	—	1.000	0.965	0.998	0.902	0.847
EK	0.820	0.894	0.872	—	0.965	0.998	0.902	0.847
RATE	0.327	0.208	0.201	0.246	—	0.979	0.983	0.955
D	0.828	0.715	0.708	0.685	0.426	—	0.926	0.877
S	0.009	0.001	0.001	0.000	0.132	0.104	—	0.993
i	0.008	0.000	0.000	0.000	0.119	0.105	0.987	—

(注) 左下の三角形部分は第 1～3 表の各最初の実験を除いた各因子間の単相関の決定係数 (n=42). 右上は第 1～3 表の各最初の実験の同様の決定係数 (n=3).

第 8 表の右上部分は、第 1・2・3 回の一連の実験の最初の実験だけを取り上げて単回帰分析したときの決定係数である (n=3). 左下は各回の 2 回目以後の実験を単回帰分析した決定係数である (n=42).

この表の左下 (各回の 2 回目以降) を見ると Q, RI, EK·I₃₀, D が関係した要素間の相関が高いことがわかる. すなわち、表面流出水量 Q を求めるとすれば RI, EK·I₃₀, D から推定すればよく、表面流出土量 D を求めるとすれば Q, RI, EK·I₃₀ から求めるのがよい. 通常考えられる斜面勾配は、単独ではあまりよい推定値をもたらさない.

次にこの表の右上 (各回の最初の実験) を見ると、Q, RI, EK·I₃₀, RATE, D は極めて相関が高い. 従って、これらの因子を用いて土壌流出量を推定することが高精度で可能であると思われるが、データ数が少ないため決定的なことはわからない. 斜面勾配係数 S や斜面勾配 i と降雨強度との間の決定係数が大きいのが、データが少ないが故の偶然と思われる.

(3) 土砂流出量 D 等の推定回帰式

第 1 回 (1.7 度と 3 度) の単回帰式は次式のとおり (ただし、各回の最初の実験は、その後のものとは異質であるので除く).

$$\text{第 1 回 (1.7, 3°): } D = 0.0428 + 0.0266 Q \quad (r^2 = 0.766, s = 0.0312, n = 9) \quad (1)$$

$$\text{第 2 回 (5, 6°): } D = 0.0727 + 0.00389 Q \quad (r^2 = 0.849, s = 0.0315, n = 16) \quad (2)$$

$$\text{第 3 回 (3, 4°): } D = 0.0544 + 0.00391 Q \quad (r^2 = 0.921, s = 0.0320, n = 17) \quad (3)$$

$$\text{第 1～3 回 (1.7-6°): } D = 0.0519 + 0.00389 Q \quad (r^2 = 0.828, s = 0.0403, n = 42) \quad (4)$$

ここに、 r^2 : 回帰の決定係数, s : 標準誤差, n : データ数.

なお、たった 3 回ではあるが、各回の最初の実験における D と Q の関係は、次式で表された.

$$\text{各回最初 (1.7-6°): } D = 0.061 + 0.0739 Q \quad (r^2 = 0.999, s = 0.112, n = 3) \quad (5)$$

次に単回帰の説明変数として降雨強度 RI (mm/hr) をとると、D を目的変数とする回帰式は次式で表される.

$$\text{第 1 回 (1.7, 3°): } D = 0.0364 + 0.00198 RI \quad (r^2 = 0.771, s = 0.0309, n = 9) \quad (6)$$

$$\text{第 2 回 (5, 6°): } D = 0.0891 + 0.00286 RI \quad (r^2 = 0.806, s = 0.0358, n = 16) \quad (7)$$

$$\text{第 3 回 (3, 4°): } D = -0.0060 + 0.00442 RI \quad (r^2 = 0.916, s = 0.0331, n = 17) \quad (8)$$

$$\text{第 1～3 回 (1.7-6°): } D = 0.0389 + 0.00334 RI \quad (r^2 = 0.715, s = 0.0518, n = 42) \quad (9)$$

各回の最初の実験における D と RI の関係は、次式で表された。

$$\text{各回最初 (1.7-6^\circ) : D = -0.0760 + 0.0145 RI (r^2 = 0.998, s = 0.0410, n = 3) \quad (10)}$$

流亡土砂量は、斜面勾配に関係があると思われる。このことを考慮に入れて、説明変数を Q と斜面勾配 i (度)、RI と i にとったときの、D を目的変数とする重回帰式は次のようになった。

$$\text{第 1 回 (1.7, 3^\circ) : D = 0.1353 + 0.00205 Q - 0.0380 i (r^2 = 0.855, s = 0.0265, n = 9) \quad (11)}$$

$$\text{第 2 回 (5, 6^\circ) : D = -0.0319 + 0.00383 Q + 0.0196 i (r^2 = 0.866, s = 0.0196, n = 16) \quad (12)}$$

$$\text{第 3 回 (3, 4^\circ) : D = -0.0038 + 0.00394 Q + 0.0164 i (r^2 = 0.927, s = 0.0319, n = 17) \quad (13)}$$

$$\text{第 1 \sim 3 回 (1.7-6^\circ) : D = -0.0086 + 0.00379 Q + 0.0163 i (r^2 = 0.887, s = 0.0330, n = 42) \quad (14)}$$

$$\text{第 1 回 (1.7, 3^\circ) : D = 0.1271 + 0.00153 RI - 0.0364 i (r^2 = 0.850, s = 0.0270, n = 9) \quad (15)}$$

$$\text{第 2 回 (5, 6^\circ) : D = -0.0010 + 0.00282 RI + 0.0169 i (r^2 = 0.818, s = 0.0359, n = 16) \quad (16)}$$

$$\text{第 3 回 (3, 4^\circ) : D = -0.0344 + 0.00444 RI + 0.0080 i (r^2 = 0.917, s = 0.0340, n = 17) \quad (17)}$$

$$\text{第 1 \sim 3 回 (1.7-6^\circ) : D = -0.0420 + 0.00333 RI + 0.0209 i (r^2 = 0.813, s = 0.0425, n = 42) \quad (18)}$$

これらの式から、表面流出量 Q を説明変数とすると、土壌流亡量の推定精度がかなり良くなること、表面流出量が得られない場合は降雨強度または降雨量 (1 実験中は一定降雨強度、一定降雨継続時間としているため、降雨強度は降雨量に比例する) でもかなりの精度で土壌流亡量の推定が可能であることがわかる。上記以外では、重回帰分析において、Q を第 1 説明変数、RATE を第 2 説明変数とした場合の決定係数が 0.863、RI を第 1 説明変数、RATE を第 2 説明変数とした場合の決定係数が 0.775 と高かった。

土壌侵食量の予測式として知られている USLE 式は次式で表される。

$$A = R \cdot K \cdot S \cdot L \cdot C \cdot P \quad (19)$$

ここに、A: 予測年平均流亡土量 (t/ha/year), R: 降雨係数。その地方で予期される降雨による裸地からの土の流亡する可能性を示す値。上述 $EK \cdot I_{30}$ の年間合計値。K: 土壌係数、土壌の受食性を示す係数で、裸地の標準区からの流亡土量を降雨係数で割った値で示す。S: 斜面勾配係数 (前述)。L: 斜面路長係数、斜面路長 l と $l_0 = 22.13(m)$ との比の n 乗 $L = (l/l_0)^n$ 。n は $S \leq 1\%$ のとき 0.2, $1\% < S < 3\%$ のとき 0.3, $3\% < S < 5\%$ のとき 0.4, $S \geq 5\%$ のとき 0.5。なお、S と L をまとめて S_L (傾斜・斜面長係数) として取り扱うことが多い。C: 作物係数、畑地の土壌流亡は裸地より少ないのでその比。P: 保全係数、横畝栽培など耕作方法による裸地との土壌流亡量の比。

USLE 式のような複数の因子による積で土壌流亡量を表すとすると、今回の実験では次式の決定係数が高かった。

$$D = 0.0756 + 0.00402 Q \cdot \text{RATE} (r^2 = 0.835, s = 0.0394, n = 42) \quad (20)$$

$$D = 0.0582 + 0.00376 RI \cdot \text{RATE} (r^2 = 0.820, s = 0.0407, n = 42) \quad (21)$$

なお、説明変数 $X = RI \cdot S$, $X = EK \cdot I_{30} \cdot S$ などは r^2 が 0.6 台で、上の 3 つより劣ったので、ここでは省略する。

地下水流出量 QU, 同流出率 RATEU, 同流出土量 DU などに関する回帰式は、データに 0 が非常に多く、信頼性に欠けると判断して、解析対象から除外した。

最後に土壌面侵食量Eについては、第1回(1.7°, 3°)については測定しておらず、第2・3回の中の初回の実験を含め、負値を除いて重相関をとった中では、次の重回帰式の寄与率(重相関係数の自乗) r^2 が良かった。

$$D = 0.0130 + 0.00327Q + 0.0734 \text{ RATE} + 0.0580E \quad (r^2 = 0.914, s = 0.0284, n = 32) \quad (22)$$

$$D = 0.0263 + 0.00341Q + 0.0645 \text{ RATE} + 0.1728E^4 \quad (r^2 = 0.924, s = 0.0267, n = 32) \quad (23)$$

単なる重回帰の寄与率だけならば、第2, 3回の最初のデータも加えた方が高くなる($r^2 = 0.983$, $s = 0.0265$, $n = 34$)。しかしここだけ初回を加えるのは便宜的にすぎるし、初回を加え、第3説明変数を E^4 としたときの r^2 が良くなかったので、ここでは割愛する。

(4) 累加流出水量・累加降雨量と累加土壌流出量

前項では単一降雨による土壌流出量の回帰式について述べた。しかし重要なのは1回毎の土壌流出量もさることながら、例えば1年間でどれだけ土壌流出が起こるかということである。そこで第1回(1.7°, 3°), 第2回(5°, 6°), 第3回(3°, 4°)の、各回の最初を除いて2回目以後の流出水量・降雨量の累加値(積算値)に対する土壌流出量の累加値の関係をプロットすると、第3図、第4図のようになった。これらの関係を、原点を通る次のような回帰式で表されると考えた。

$$Y = B \cdot X^P \quad (24)$$

ここに、Y: 回帰の目的変数、累加土壌流出量(mm), B: 回帰係数、X: 回帰の説明変数、ここでは累加流出水量(mm)または累加降雨量(mm)、P: Xに掛かるべき指数。

Pを0.01刻みに変化させて、標準誤差が最小となるときのPを求めると、X = 累加流出水量(mm)のとき、第1回~3回の各々について $P = 0.72, 0.82, 0.76$, X = 累加降雨量のとき、 $P = 0.75, 0.78, 1.0$ であった(第3・4図参照)。

そこで、累加流出水量をXとするときの最適 $P = 0.8$ とすると、XとYの関係は次式で表される(第4図の点線で示す)。

$$\text{第1回: } Y = 0.0166 X^{0.8} \quad (s = 0.126, n = 9) \quad (25)$$

$$\text{第2回: } Y = 0.0275 X^{0.8} \quad (s = 0.105, n = 16) \quad (26)$$

$$\text{第3回: } Y = 0.0260 X^{0.8} \quad (s = 0.195, n = 17) \quad (27)$$

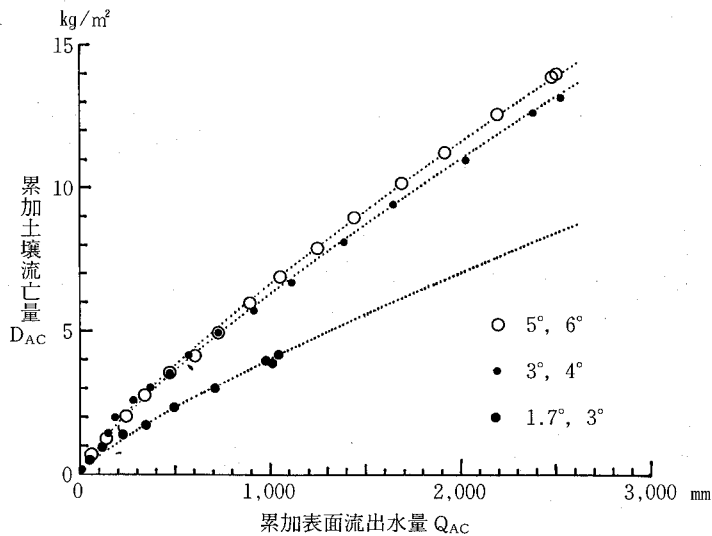
次に累加降雨量をXとしたときについては、第3回がかけ離れたP値をとるため、一律に扱うことが難しい。しかし、第3表をよく見ると、実験⑩までと⑪以降とは、表面流出率が様変わりになっており、第4図のプロットも、実験⑩までは曲線性を帯びていたのが、⑪以降は直線的に変化している。そこで第3回については②~⑩のみについて(24)式を適用することとし、上と同様の方法によって第1~3回の各々の最適Pとして $P = 0.75, 0.78, 0.83$ を得た。これも $P = 0.8$ に統一して次式を得た。

$$\text{第1回: } Y = 0.0123 X^{0.8} \quad (s = 0.097, n = 9) \quad (28)$$

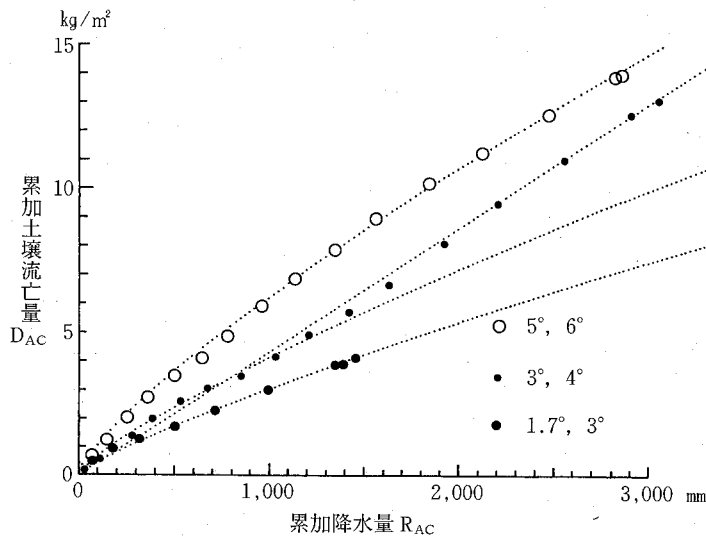
$$\text{第2回: } Y = 0.0244 X^{0.8} \quad (s = 0.146, n = 16) \quad (29)$$

$$\text{第3回: } Y = 0.0163 X^{0.8} \quad (s = 0.122, n = 9) \quad (30)$$

これらの関係を第5図に示す。点線が回帰式(25)~(30)式を表す。なお、第5図の第3回には(30)式と併せて第3回の最初を除く全実験の最適回帰式 $Y = 0.00428 X$ ($s = 0.207, n = 17$)も併せて示した。



第4図 累加土壌流亡量と累加表面流出水量との関係

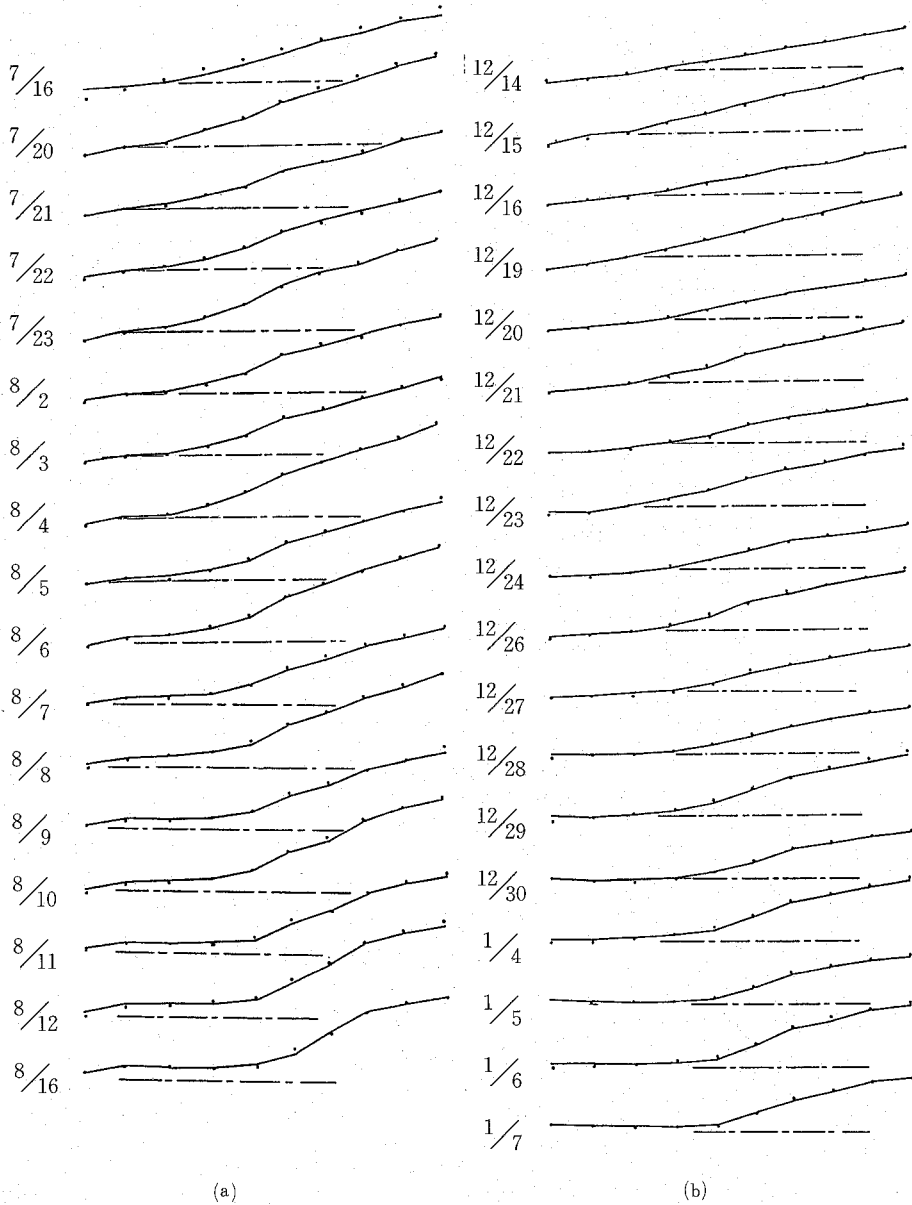


第5図 累加土壌流亡量と累加降雨量との関係

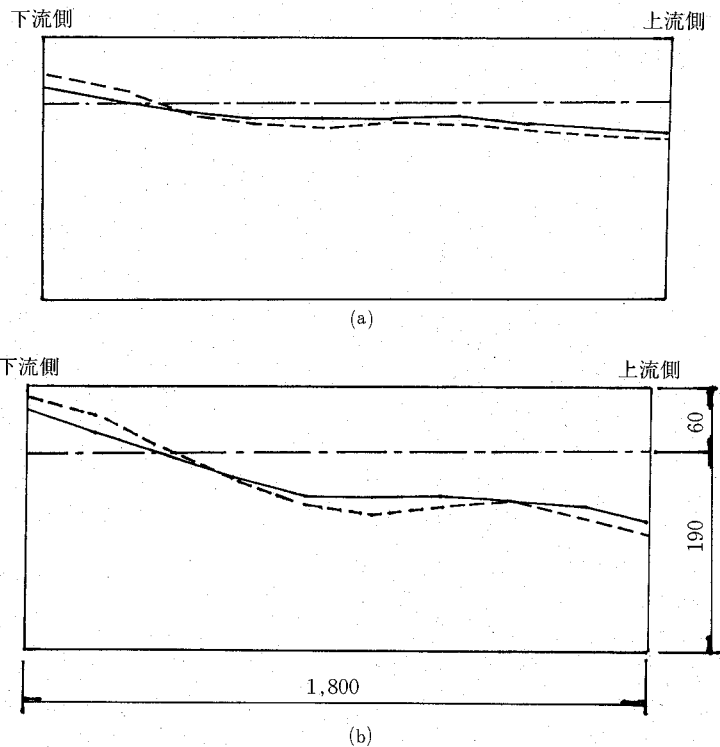
(5) 土壌面高さから測定した土壌面侵食高の推移

各実験の前後の土壌面高さを20cm間隔でメジャーで測った縦断面図を第6図(a), (b)に示す. 第6図の鉛直方向は水平方向に対して1:3の割合で拡大してある. 図の中の黒点は実験前の, 実線は実験後の土壌表面高さ, 一点鎖線は作図と斜面勾配を読み取る便宜のために引いた水平線(必ずしも厳密に基準高さを表してはいない)である. 第6図(a)は第2回(5°, 6°), (b)第3回(3°, 4°)である. この種の枠試験の常として, 最下流付近に土砂が堆積し, その直上流が侵食され, 最上流部は傾斜勾配はそれほど急にはなっていない. 上・中流部が侵食を受け, 下流部が堆積を受けた結果, 途中(8月5日と12月4日), 及び最終(8月16日と1月7日)の土槽の状態は, 第7図(a), (b)に示すようであった. 土槽の右側が上流側, 左側が下流側である. 図中の点線が第2回(5°, 6°),

実線が第3回(3°, 4°)である。第7図(a)を見ると、実験途中では中流部から上の第2回と第3回の土壌表面形はあまり変わらず、ただ侵食量に差が見られる程度であるが、同図(b)を見ると、最終的な土壌表面形は相当に変わってきていることがわかる。つまり、このような枠試験では、降雨強度だけではなく、斜面勾配の大小が土壌表面形に差異を与えることがわかる。



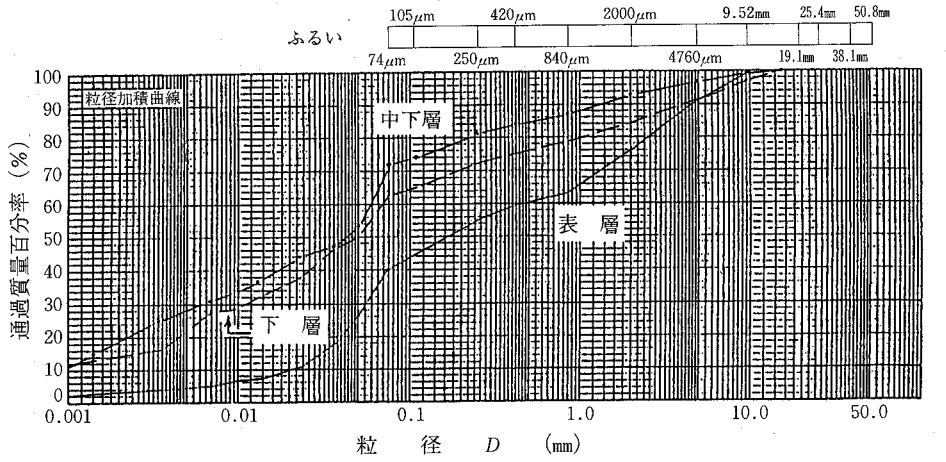
第6図 土壌侵食による土壌面高の変遷
 (a) 5°, 6° (b) 3°, 4°



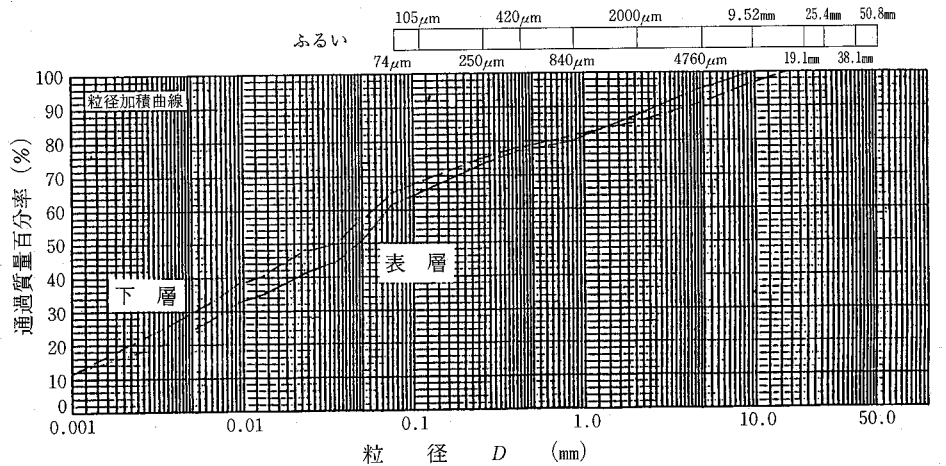
第7図 (a)実験途中(8/5, 12/4)及び(b)実験終了時(8/16, 1/7)の
土壌縦断面形(点線は第2回, 実線は第3回)

(6) 土槽内残留土の粒度試験の結果

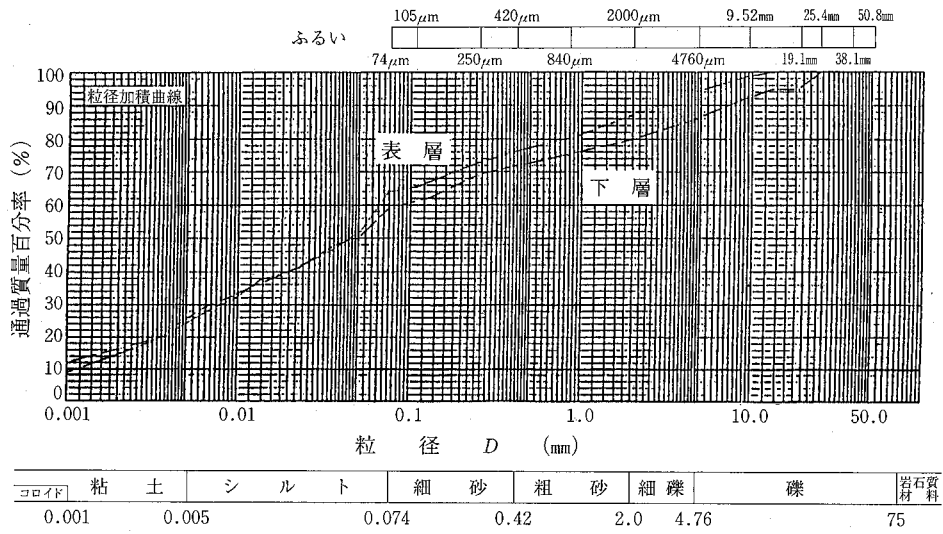
第4表には第3回(3°, 4°)実験終了後の土槽内残留土の粒径分布を重量百分率で示す。ここに表層は土壤表面から10cm以内, 中上層は10~13cm, 中下層は13~14cm, 下層は20cmで採土した。また番号は, 下流側から20cm刻みでブロック分けしたときのブロック番号である。平均値を見ると, 粒径0.074~0.005mmを境として表層土には粒径の大きいものが, また下層には粒径の小さなものが多いことがわかる。標準偏差でみると, 表層土は粒径の小さな土がブロックごとに遍在しているのに対し, 下層土では0.42~0.074mmを除いて粒径の大きな土が遍在していることがわかる。総じて表層は粗砂が多く, 下層土では上・下流ではコロイド成分が多いが, 中流では少なくなっている。第8図(a), (b), (c), (d)には2, 6, 8, 9ブロックの粒径加積曲線を示す。2ブロックの下層にコロイド成分が集積していること, 6ブロックは粒径0.05~0.07mmで通過質量百分率が急増しており, ややコロイド成分が少ないこと, 8ブロックは表層よりも下層の粒径が大きいものの比率が高いこと, それが9ブロックでは逆に表層土の方が下層土よりも粒径が大きいものの比率が高いことがわかる。



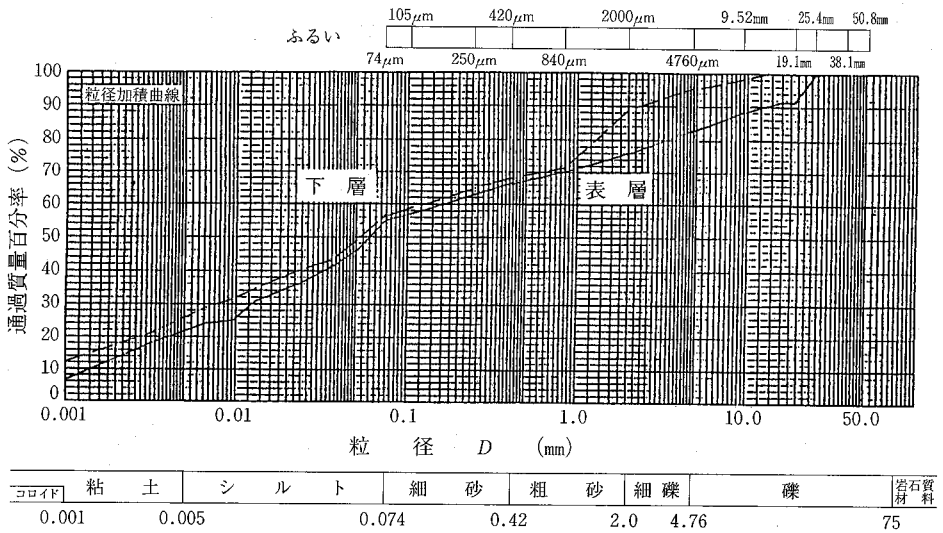
第8図 (a) 2ブロックの粒径加積曲線



第8図 (b) 4ブロックの粒径加積曲線



第8図 (c) 8ブロックの粒径加積曲線



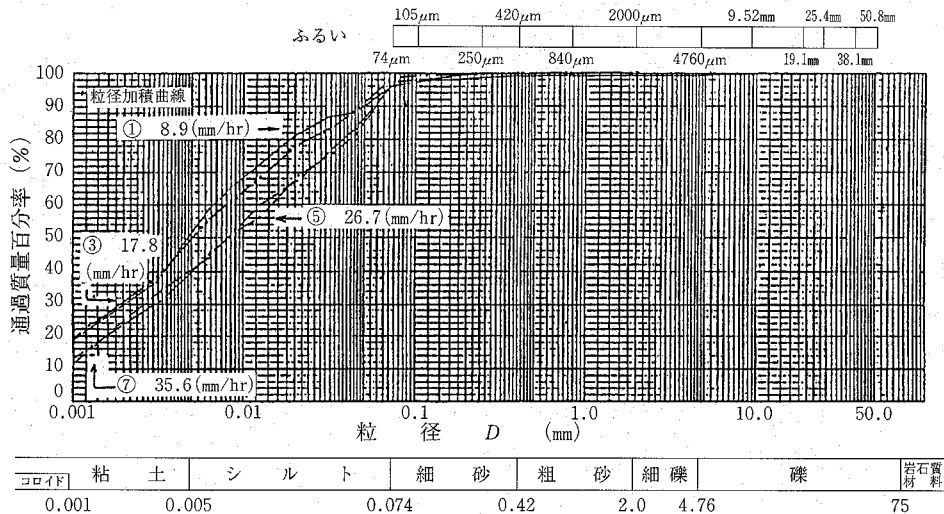
第8図 (d) 9ブロックの粒径加積曲線

(7) 表面流出土の粒径分布

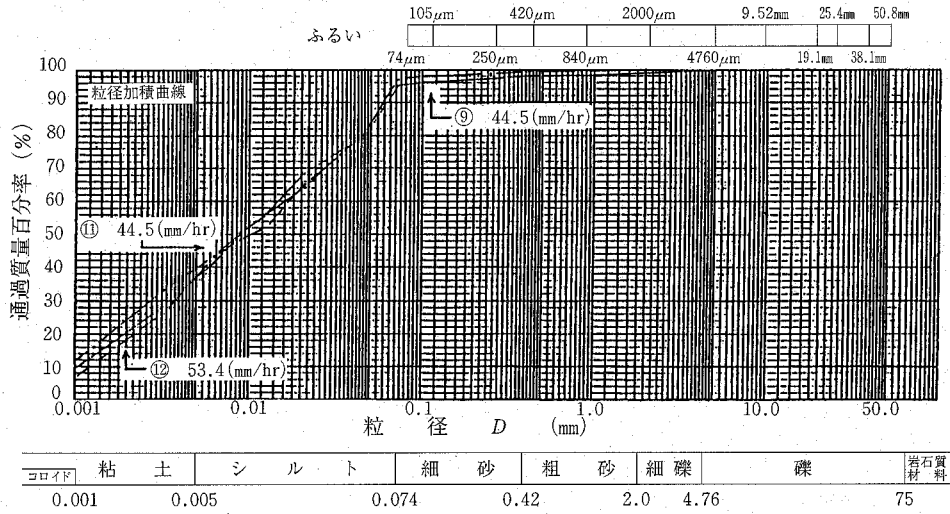
第5表(a), (b)にはそれぞれ勾配3度及び4度(第3回)の流亡土砂の粒度分布を示す。番号は第1・2・3表の実験番号である。粒径0.001mm以下の加積通過率は実験初期の①~⑥に多い。最後の⑦も多いが降雨強度がそれまでよりも少ないことからすれば不思議であり、多少を問わずそれまでと違った、降雨強度のとき、斜面はバランスを失って多くの微粒子成分を流出させるのかも知れない。2~0.42mmの粒径(粗砂)は4度のパーセンテージが高い。しかし、細砂以下については3度と4度のパーセンテージの差は(少なくとも平均値では)僅かである。4度の0.074mm以下の土についての標準誤差が、3度よりも小さいのは、3度の降雨強度が常にそれに先行する実験と変わるのに対し、4度では傾斜角度こそ急にはなるが、降雨強度が前の3度と同じため、安定した斜面条件にあるからであろう。0.42mm以下の3度と4度のパーセンテージの平均値が酷似しているのは、初めてその強度の降雨を受けるのと、傾斜が3度から4度増加するのとはほぼ同様の効果があるのだとも考えられる。

再び2~0.42mmについて述べると、この粒度のパーセンテージが大きいのは、3度では⑨(44.5mm/hr)であり、4度では⑥(26.7mm/hr)、⑧(35.6mm/hr)の時である。降雨強度が大きいときは、もとより大量の土砂を流亡させるが、この程度の中間的強雨について、粒径大なる土砂を効率的に運搬する能力があるとすればおもしろいが、この点は実験の条件によって違うということも考えられるので、さらに検討が必要である。

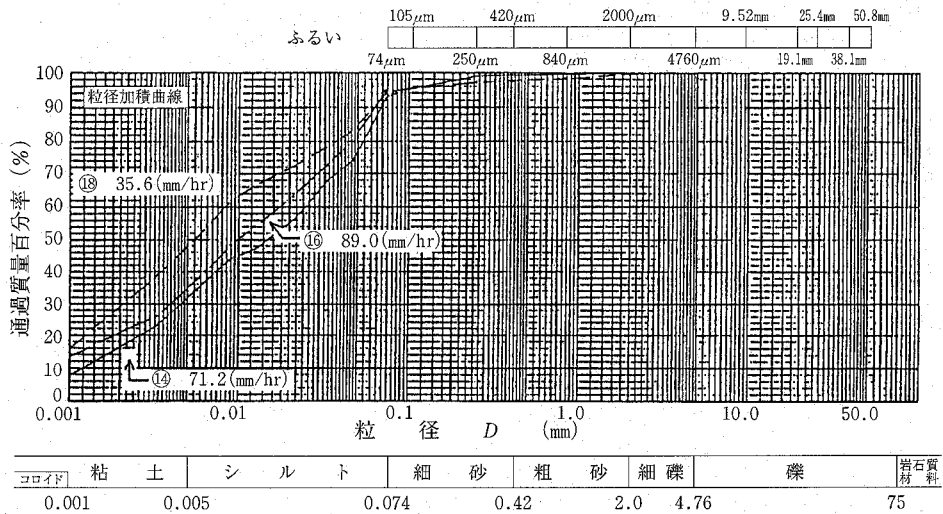
第9図(a), (b), (c)には表面流出土の粒径加積曲線を示す。降雨強度が小さいときには、粒径の小さな成分が流出していることがわかる。



第9図 (a) 3度①③⑤⑦の粒径加積曲線



第9図 (b) 3度⑨①⑫の粒径加積曲線



第9図 (c) 3度⑭⑯⑰の粒径加積曲線

要 約

室内人工降雨による土壌侵食実験の困難な点は、実際の斜面とそっくり同じ条件を再現することが難しいということである。例えば現地の圃場の大きさと土層厚からは程遠い小規模の実験に留まらざるを得ないし、下流に堆積し、その直上部が大きく侵食され、最上流部は比較的穏やかにしか侵食されないという、枠試験にも共通する独特の侵食・堆積地形の出現を妨げることはできなかった。造成直後とはいえ、現地も多少の植生はあるであろうし、また降雨の雨滴径や地表との衝突速度、ひいてはエネルギーが実際の降雨とは異なるであろう。今回の実験のように幅の狭い土槽を用いたときは、地表面に衝突した後土槽の外に飛散する雨量が相当量になった。排除された雨量は、表面湛水量を実際よりも減少させ、クッション効果による雨滴の衝突のエネルギー減殺を多少緩和するかもしれないが、表流水の減少による掃流力、土粒子の運搬能力を減少させられると思われる。この外、実際の雨では、雨量強度が刻々変化するが、今回の実験では常に一定降雨強度という、現実にはあり得ない設定となっている。そして土壌流亡・侵食への影響が、果して降雨強度によるのか降雨量のせいなのかははっきりと区別できないところが今回実験の反省点でもある。また現実には上流から流されてきた土砂は、掃流力が落ちるとそこに堆積するし、侵食自体もリルやガリに沿った所で激しく起こるが、今回の実験スケールでは、そのようなリルやガリの発達は望むべくもなかった。実際の降雨は間断的に起こり、降雨と降雨の間には蒸発・浸透などにより大きく土壌水分が変動し、浸透時の毛管水の水ミチが途切れてしまうことも多いが、今回の実験は比較的連続して、ずっと室内で行ったため、そのような条件は生じなかったと考えられる。実際には、連続した降雨でない限り、降雨の地下浸透は土中の空気を排除しつつ進行するが、今回その条件を満足したのは、3回行った一連の実験の最初だけであったと思われる。降雨開始後、地下に浸透するには多少の時間がかかる。この地下浸透機構の有無は、土壌流出量に影響が大きかったと思われる。

しかし、降雨強度を一定に保つ、あるいは異なる降雨強度を試みるができるなど、人工降雨に伴うメリットも大きかったと思われる。ここで得た結果は、ただちに現地に適用可能とはいえないが、少なくともできるだけの不確定要素を取り除いた。その意味では科学的な実験であったといえよう。

この実験の結果得られた知見は、次のようなものである。

(1) 第1回 (1.7°, 3°), 第2回 (5°, 6°), 第3回 (3°, 4°) の一連の実験の最初の実験だけは土壌流出量が非常に大きく、ほとんど連続して行ったそれ以降の実験とは異質の結果を得た。

(2) 土壌流出量は表面流出水量、降雨強度 (あるいは降雨量) と高い相関関係がある。

(3) 土壌面侵食高は、それ自身の土壌流出量との相関は高くはないが、表面流出量や表面流出率と一緒に重回帰をとると、土壌流出量の推定に有効である。

(4) USLE 式と似た形の、因子の積で土壌流出量を推定しようとした場合、表面流出量×表面流出率を説明変数とした場合の重回帰の決定係数 ($r^2 = 0.835$) が高く、ついで降雨強度×表面流出率 ($r^2 = 0.824$)、EK (降雨の運動エネルギー) ×表面流出率 ($r^2 = 0.822$) の順であった。

(5) 勾配 6° 以下の範囲で、降雨強度や斜面勾配を変化させての各回一連の実験の累加表面流出水量と累加土壌流出量とは、前者の 0.8 乗を説明変数とし、後者を目的変数とする単回帰をとると、高い精度で土壌流出量が推定できる。

(6) 流亡土砂の粒度分析をすると、小さい降雨強度では粒径の小さい成分、大きい降雨強度では大きい粒径の土砂が流出してくる。

キーワード：土壌侵食，土壌流亡，土砂流亡，人工降雨，流亡土砂

参 考 文 献

- 1) 近森邦英：平成元年度高知西南開拓建設事業国営農用地開発等付帯防災施設調査報告書 (1990)

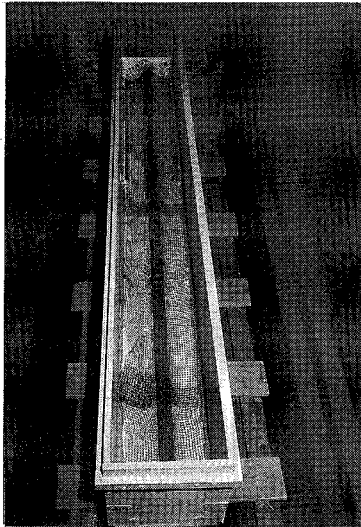


写真1 土を充填する前の土槽
(1988年3月)

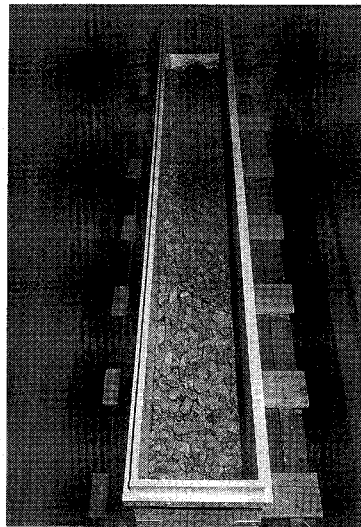


写真2 砂利充填後



写真3 突き固め中
(上方の四角い棒で)

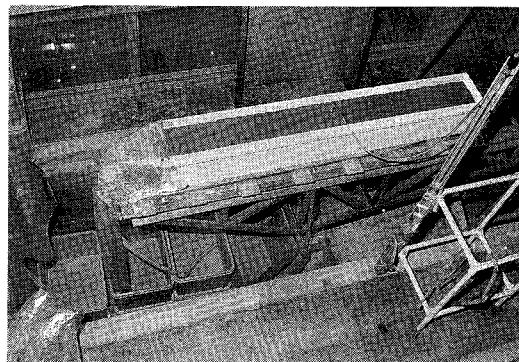


写真4 実験準備完了
(ビニール筒の垂れ下がっている箱は表面流出水の土砂溜。パイプは地下流出水の土砂溜。中央右寄りには水分張力計測用のマンオメーター)

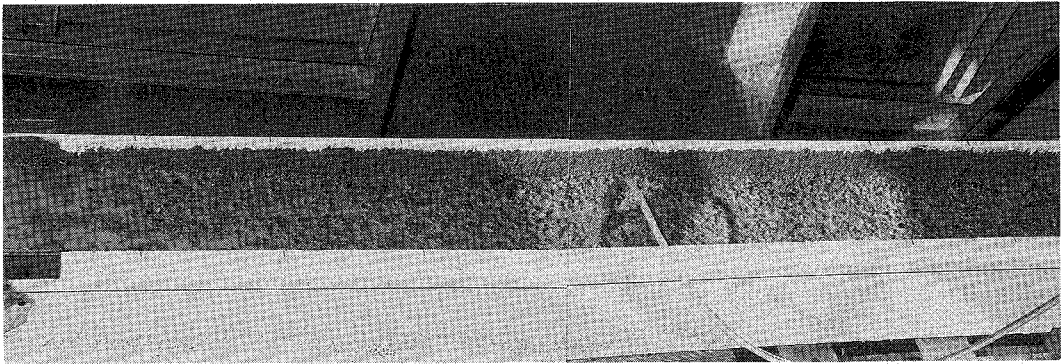


写真5 12月20日 (勾配3度, 降雨強度30mm) 実験開始後2時間40分

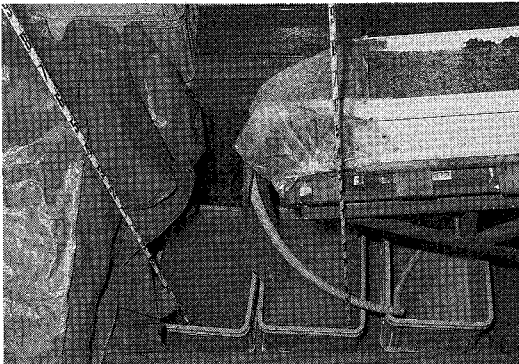


写真7 7月16日 (勾配5度, 降雨強度89mm/hr) 実験終了後
(左2つの柵は表面流出水土用, 右は地下流出水土用)

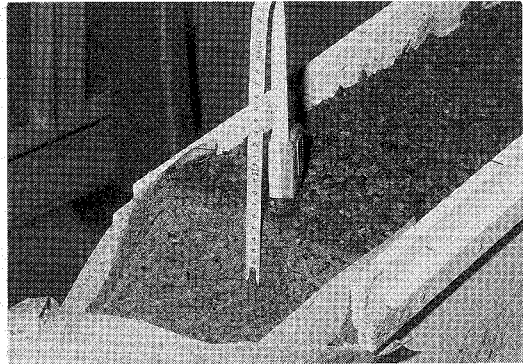


写真8 8月11日 (勾配6度, 降雨強度71.2mm/hr) 実験終了後の土槽最下流部の土砂堆積状況

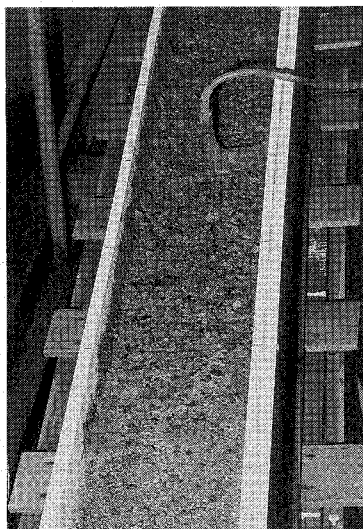


写真9 8月3日 (勾配5度, 降雨強度35.6mm/hr) 実験終了後 (中流-下流)

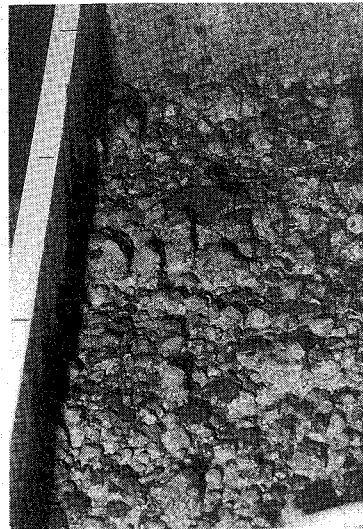


写真10 1月6日 (勾配4度, 降雨強度89mm/hr) 実験終了後 (最上流)

付表1 A圃場の土壌の諸特性

資料番号		A上	A中	A下	A1回	A2回	A3回
粒 度 特 性	礫分 (2000 μ m以上) %	12.79	25.39	13.52	1.94	2.09	2.04
	砂分 (74-2000 μ m) %	30.40	25.92	27.62	12.42	48.56	20.99
	シルト分 (5-74 μ m) %	49.81	33.19	44.06	48.64	32.85	41.17
	粘土分 (5mm以下) %	7.0	15.5	14.8	37.0	16.5	35.8
	最大粒径 mm	23.20	35.60	22.40	12.70	16.53	14.6
	均等係数 U_c	16.176	97.917	34.62	13.00	65.385	—
	曲率係数 U_c^1	0.535	0.574	1.385	1.111	0.579	—
	土粒子の比重 G_s	2.670	2.704	2.703			
自然状態含水比 W_n %		19.40	17.63	18.66	上20.6 中19.1 下23.9	22.47 18.70 24.39	24.02 21.40 23.46
	透水試験 $k*10^{-5}$ cm/sec		6.65				
	現場密度 ρ_{dg}/cm^3	1.214	1.241	1.239			

付表2 B圃場の土壌の諸特性

資料番号		B上	B中	B下	A1回	A2回	A3回
粒 度 特 性	礫分 (2000 μ m以上) %	18.67	11.75	25.98	0.80	6.77	3.00
	砂分 (74-2000 μ m) %	25.59	28.54	24.68	3.20	37.24	26.18
	シルト分 (5-74 μ m) %	53.74	39.71	45.34	52.5	37.99	38.82
	粘土分 (5mm以下) %	2.0	20.0	4.0	43.5	18.0	32.0
	最大粒径 mm	32.60	22.60	20.80	7.63	15.32	6.50
	均等係数 U_c	10.909	44.444	35.897	9.20	50.00	34.00
	曲率係数 U_c^1	0.273	1.174	0.103	1.113	0.761	0.569
	土粒子の比重 G_s	2.699	2.700	2.668			
自然状態含水比 W_n %		22.31	22.92	21.28	上23.3 中22.6 下23.6	23.42 23.57 22.29	22.16 22.98 24.11
	透水試験 $k*10^{-5}$ cm/sec		5.97				
	現場密度 ρ_{dg}/cm^3	1.171	1.197	1.255			

付表3 C圃場の土壌の諸特性

資料番号		C上	C中	C下	A1回	A2回	A3回
粒 度 特 性	礫分 (2000 μ m以上) %	10.21	12.48	19.69	0.28	7.13	1.13
	砂分 (74-2000 μ m) %	26.01	25.49	24.73	1.85	21.98	17.15
	シルト分 (5-74 μ m) %	62.78	37.03	53.58	49.37	47.39	48.72
	粘土分 (5mm以下) %	1.0	25.0	2.08	48.5	23.5	33.0
	最大粒径 mm	22.80	30.60	22.80	7.33	22.70	6.80
	均等係数 U_c	5.664	40.625	12.842	—	38.00	11.667
	曲率係数 U_c^1	0.581	0.471	0.146	—	0.360	1.205
	土粒子の比重 G_s	2.684	2.671	2.645			
自然状態含水比 W_n %		22.26	23.32	21.60	上24.6 中25.1 下22.4	21.82 25.47 24.98	23.30 24.59 27.57
	透水試験 $k*10^{-5}$ cm/sec		3.85				
	現場密度 ρ_{dg}/cm^3	1.302	1.142	1.223			

平成8(1996)年9月30日受理

平成8(1996)年12月25日発行