

擬似降雨による土壌侵食のメカニズム

—表面流水による侵食—

藤原輝男*・山本晃**

Mechanism of Soil Erosion under Simulated Rainfall

—Erosion by Runoff—

Teruo FUJIWARA and Akira YAMAMOTO

Abstract

For the purpose of making clear the mechanism of soil erosion, rate of eroded soil in keeping with the change of slope steepness and rainfall intensity was examined.

The relationship between elapsed time and erosion rate were almost linear. This shows erosion rate is uniform during duration of rain.

Erosion rate increases as the rainfall intensity and slope steepness increase. The concentration of soil in water also increases with the rainfall intensity and slope steepness increase.

From the results of analysis of size distribution of eroded soil, fine soil particle is eroded easily.

Results of multiple regression analysis, we obtained following relation $E=0.18 I^{1.30} S^{0.66}$.

1. 緒言

土壌侵食の現象は雨滴の衝撃力による土粒子の剝離・輸送および地表水流による剝離・輸送という4つのプロセスをとるが、土壌侵食量は降雨特性、土壌特性、地形特性、植生・保全工などによって規定され、これらの絡み合いによって決定される複雑なメカニズムをもつ。

1945年 Wischmeier は土壌侵食量を求める式として、関係ある因子を積の形で表わした土壌侵食予測式

$$A = R \cdot K \cdot S \cdot C \cdot P^{11} \quad \dots \dots (1)$$

(A: 年平均土壌侵食量, R: 降雨因子, K: 土壌因子, S: 地形因子, C: 植生因子, P: 保全因子) を発表し、それぞれの地域において各因子の値を決定する地域別因子数値化の方法を提案し、以来アメリカにおいては圃場実験および現場データの収集・解析が精力的に行なわれている。わが国においても近年圃場実験を含む

土壌侵食研究が急激に進められつつあり、その一部は土壌侵食のメカニズムに主点を置いた因子間の関数関係の解明に向けられている。

本実験はこれら土壌侵食現象メカニズム解明の一端として降雨発生装置による擬似降雨を用いての土壌侵食量の定性的傾向を求めるとに行なったもので、本報は降雨強度、傾斜角を変化させたときの表面流水による土壌侵食量に関するものである。

2. 実験装置および方法

風の影響を避けるために四面をビニール波板によって囲んだ高さ 12 m の鉄塔の最上端に降雨発生装置を設置し、床面にセットした試料土に擬似降雨を与えて実験を行なった。降雨発生装置はバルブにより任意の降雨強度が得られる。

試料土は 2 mm の篩を通過したマサ土を長さ 1 m, 幅 30 cm, 深さ 5 cm の実験用土槽に填充し、土壌の締め固め条件が各実験でほぼ同じになるよう最適含水比の土壌を 17.5 kg のローラーを 20 往復させて転圧したのち表面をストレートエッジで平坦に成形して用い

* 建設工学科

** 大学院工学研究科 土木工学専攻

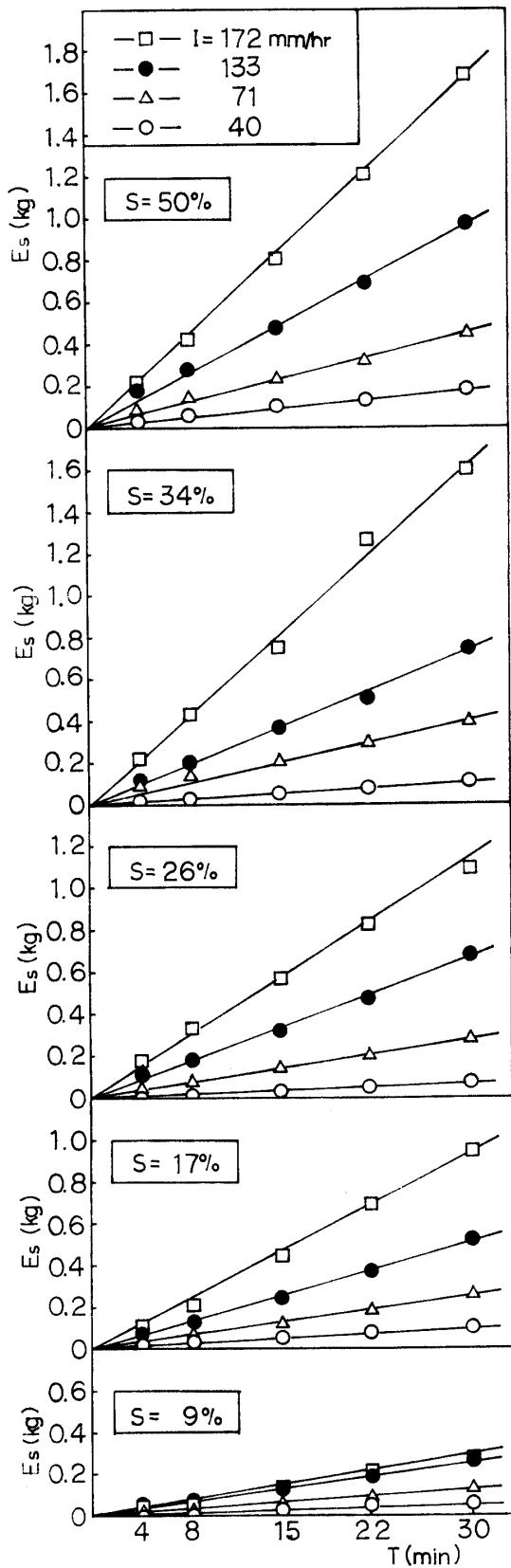


Fig. 1(a) Eroded soil rate (E_s).

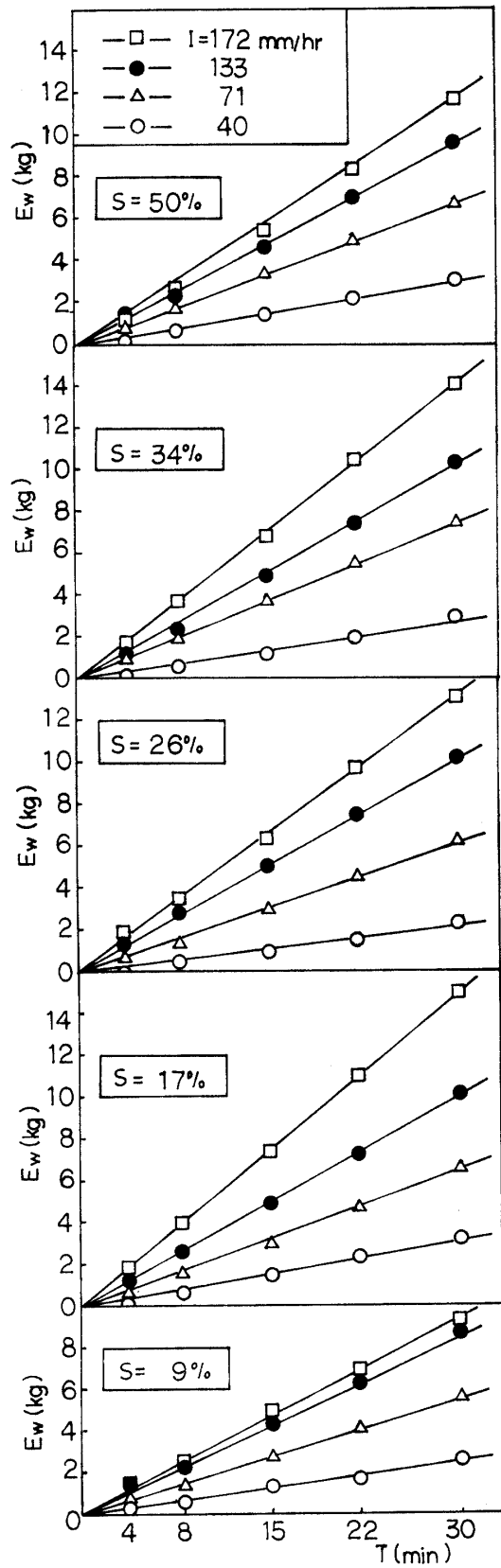


Fig. 1(b) Surface water rate (E_w).

Fig. 1 E_s and E_w as a function of T at combination of 4 different rainfall intensities and 5 different slopes. (E_s : Weight of eroded soil, E_w : Weight of surface flow, T : Rainfall duration, S : Slope, I : Rainfall intensity)

たが、締め固められた試料土の乾燥密度は 1.6 g/cm^3 であった。

実験方法は所定の降雨強度に安定した後実験を開始し、実験開始後4, 8, 15, 22, 30分後の表面流出土量を収集し、沈澱を待って上澄み水を除き、乾燥させた後重量を測定し、さらに篩分け試験により表面流出土の粒径分布を求めた。

実験の種類としては傾斜角を 5° , 10° , 15° , 20° , 30° ($\sin \theta$: 9, 17, 26, 34, 50%) の5種類につきそれぞれ降雨強度を 40, 17, 133, 172 mm/hr (水圧計レベル値 50, 100, 150, 200) の4段階に変え合計20通りにつき行なった。

3. 実験結果および考察

3.1. 降雨継続時間と侵食土量および表面流出水量

降雨が始まってから4, 8, 15, 22, 30分後の流出土の重量の累加値は各時刻までの降雨継続時間の侵食土量を示す。この値を用いて表面侵食土量 E_s と降雨継続時間 T との関係プロットすると Fig. 1 (a) のように一定の傾斜角、降雨強度では表面侵食土量は降雨継続時間とほぼ1次の関係をもつ。このことは単位時間当りの侵食土量はほぼ一定で、降雨の降り始めとか途中で侵食土量の増減は認められないことを意味する。

同様に表面流出水量 E_w と降雨継続時間 T との関係を示す Fig. 1 (b) についても E_s の場合とほぼ同じ傾向を示す。

3.2. 降雨強度と表面侵食土量および表面流出水量

いま継続時間30分の表面侵食土量のみをとりあげ降雨強度との関係を求めて Fig. 2 (a) に、表面流出水量と降雨強度についてを Fig. 2 (b) に示す。

Fig. 2 (a) で侵食土量は降雨強度の増大に伴って増加し、その増加割合は降雨強度が大きい程大となるが、Fig. 2 (b) の表面流出水量に関しては降雨強度にほぼ比例して増加する傾向をもち、さらに傾斜角の変化による侵食量の変化が小さい。以上のことは激しい雨になる程降雨雨滴のもつエネルギー自体およびそれによる土粒子飛散や表面流水による侵食が加速的に増大するためと思われる。なお表面流水の量は降雨強度が変化しても飛散や浸透する量と表面を流下する量との割合が一定であることを示し、またある一定の降雨強度の場合、傾斜の緩急にかかわらず表面流出水量はほぼ一定であることを意味している。(以下、時間明記なきものは30分経過時の値である。)

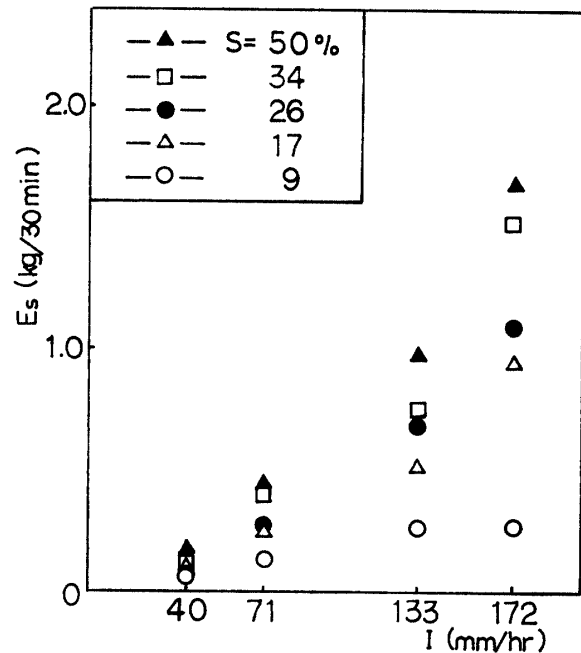


Fig. 2(a) Relationship between E_s and I . (After 30 minutes)

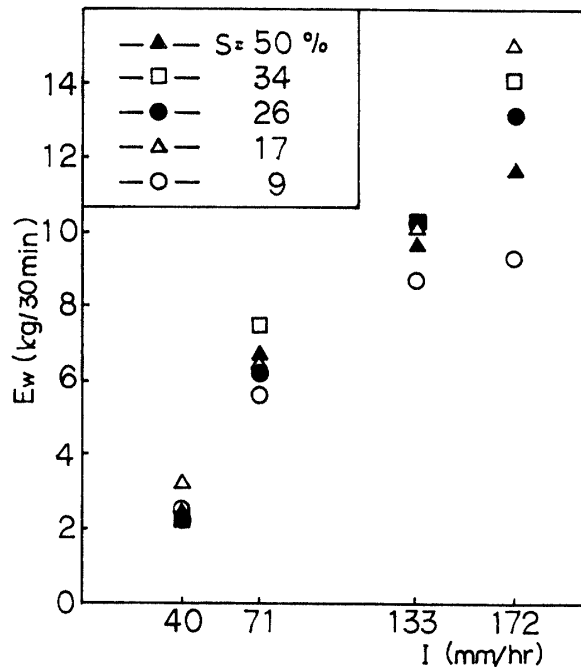


Fig. 2(b) Relationship between E_w and I . (After 30 minutes)

3.3 E_s/E_w

表面流出土量 E_s と表面流出水量 E_w の比は単位の水量中に含まれる土砂量すなわち土砂の濃度を示すが、この値と降雨強度との関係をプロットしたのが Fig. 3 である。

各傾斜共、降雨強度が大になるに伴ない濃度が増大し、傾斜大なる程降雨強度の影響を強く受ける傾向を

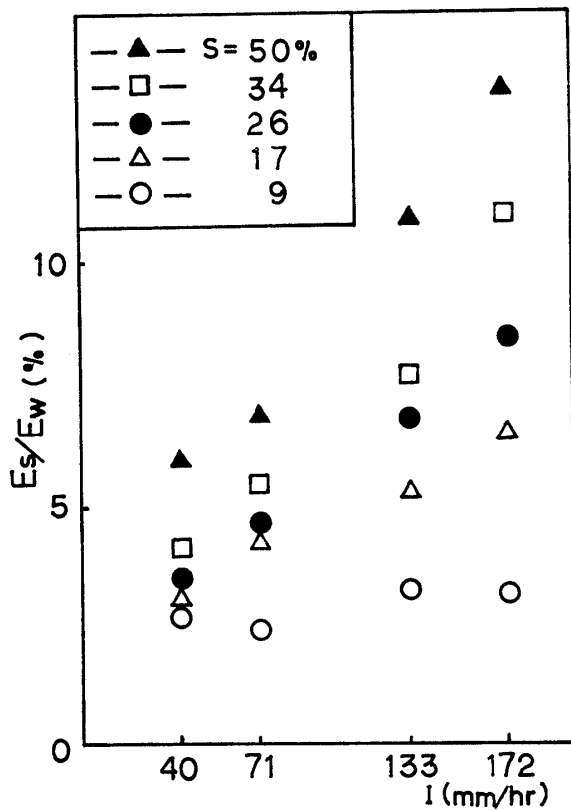


Fig. 3 Relationship between E_s/E_w and I .

示している。すなわち傾斜，降雨強度が大である程侵食土壌の濃度は濃くなる。

3.4. 侵食土砂の粒径分布比 γ 。

実験に用いた試料土を篩分けして粗砂 d_1 (2.0~0.42 mm)，細砂 d_2 (0.42~0.074 mm)，シルト分以下 d_3 (0.074 mm 以下) に区分してそれぞれの重量の全体重量に対する割合 (%) を求めておく。実験を開始して各時刻毎に収集した侵食土砂を乾燥させたのち篩分けして上記3区分のそれぞれの重量を測り侵食された土砂の全重量に対する割合 (%) を求め，各粒径区分の侵食土砂の割合を試料土のそれで除した値をもって各区分の粒径分布比とする。したがってこの粒径分布比の値が大きいときはその粒径の砂は侵食され易いことを示す。

このようにして求めた粒径分布比を実験開始後30分の侵食土砂について降雨強度の関数として求めた図が Fig. 4 である。

Fig. 4 よりシルト分以下については，降雨強度の小さい雨によってもかなり侵食されて粒径分布比は3にも達し，弱雨の場合シルト分以下が侵食土砂の大きな部分を占めることを示す²⁾。降雨強度が増大するにつれ，大きい粒径の土砂も侵食され出すためにシルト分

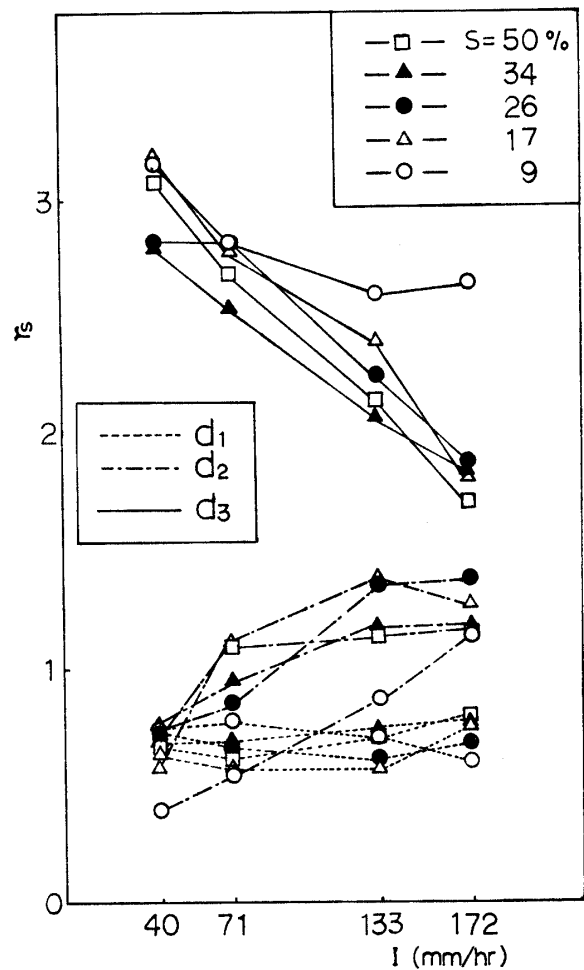


Fig. 4 Relationship between rainfall intensity and size distribution of eroded soil particle. (r_s : distribution ratio)

以下の粒径分布比は減少してゆき $I=172$ mm/hr では 1.8 程度にまで下がるが，それでも他のものに比較して侵食され易い傾向は失わない。なお傾斜角による粒径分布比への影響についてははっきりした傾向はつかめなかった。

次に細砂については $I=40$ mm/hr の弱い降雨の場合には粗砂とほぼ同じ程度の侵食されにくさを示すが，降雨強度が増大するとシルト分に次いで侵食され易さを示す。

最後に，粗砂は降雨強度の増加に関してほぼ一定値を維持し，細砂，シルト分以下のものに比して侵食されにくい。また傾斜の変化に対してさほどの差が認められない。

4. 解 析

以上，実験結果について述べたが，ここでそれらの

Table 1 Measured weights of eroded soil E and runoff W in kg

I (mm/hr)	Soil (kg)				Water (kg)			
	40	71	133	172	40	71	133	172
9	0.11	0.20	0.34	0.42	2.99	6.56	9.83	11.43
17	0.15	0.35	0.67	1.13	3.70	7.46	11.66	17.44
26	0.15	0.38	0.87	1.35	2.62	7.10	11.90	15.97
34	0.18	0.53	0.94	1.90	3.24	7.50	11.78	16.51
50	0.32	0.66	1.30	2.08	3.49	7.67	11.38	14.04

where $E = E_s + E_{sd}$, $W = E_w + S_{wd}$

S_{sd} : Downward splash soil

E_s : Eroded soil by surface water

S_{wd} : Downward splash water

E_w : Runoff

データを用いて降雨強度、傾斜角と表面侵食土量との間の関数関係についての回帰分析の検討を加えてみる。なお、実験に際しては同時に飛散量の測定も行なっており、下流方向飛散量も実際上侵食量となるため表面侵食土量に下流方向飛散量を加えた値をもって解析を行なった。表面流出水量も同じく下流側飛散水量を加えたものを用いたがそれらの値を Table 1 に示す。

4.1. 傾斜角および降雨強度と侵食土量の関係

いま、土壌損失予測式としての (1) 式の関係を用いると、本実験では I と S 以外の因子は一定としたため (2) 式で表わされる。

$$E = C_{IS} \cdot I \cdot S \quad \dots\dots (2)$$

なお、本実験は一定強度の擬似降雨を用いた (R は I の関数) ので簡便上 R の代りに I により解析を試みた。

ここに E : 土壌損失量, I : 降雨強度, S : 傾斜角, C_{IS} は比例定数。

4.1.1 傾斜角と侵食土量

傾斜角と侵食土量の関係式として

$$E = C_S \cdot S^m \quad \dots\dots (3)$$

$$E = C_S(a + bS + cS^2) \quad \dots\dots (4)$$

なる 2 次式型と指数型の 2 つを用いる。

いま (3) 式の両辺の対数を取り, $\log E = Y$, $\log C_S = C$, $\log S = X$ とおくと $Y = C + mX$ となり最小二乗法にて定数を求め $C_S = 10^C$ を考慮して表わすと (5) 式のようなになる。なお (5) 式を用いた計算値を Fig. 5 (a) に実線にて示した。

$$\left. \begin{aligned} I = 40 \text{ mm/hr} & \quad E = 32.5 S^{0.52} \\ I = 71 \text{ mm/hr} & \quad E = 53.4 S^{0.63} \\ I = 133 \text{ mm/hr} & \quad E = 84.0 S^{0.69} \\ I = 172 \text{ mm/hr} & \quad E = 79.0 S^{0.85} \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

同様に (4) 式の型の定数を求め結果を図示したものを Fig. 5 (b) に示す。

Fig. 5 (a) においては高強度の雨に対して実測値との差が大きいが低強度の雨に対してはかなりよい傾向を示し Fig. 5 (b) においては緩傾斜において適切な傾向を与えない。

次に

$$E = C_S(A + B \log S) \quad \dots\dots (6)$$

なる式型を仮定して定数を求めた結果 (7) 式を得た。

$$\left. \begin{aligned} I = 40 \text{ mm/hr}; & \quad E = -132 + 226 \log S \\ I = 71 \text{ mm/hr}; & \quad E = -336 + 548 \log S \\ I = 133 \text{ mm/hr}; & \quad E = -724 + 1114 \log S \\ I = 172 \text{ mm/hr}; & \quad E = -1521 + 2086 \log S \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

(7) 式による計算結果を Fig. 5 (c) に示す。比較において Fig. 5 (c) は Fig. 5 (a), Fig. 5 (b) 型の式型の場合より良好な適合性をもつように思われる。傾斜角が 5% 以下では侵食土量は 0 を示し、これは Meyer の述べている侵食の起こらないか関知出来ない程の侵食しか起こらない限界コウ配の存在を示しているように思われる。ただしこのことは本実験では 9% 以上の斜面についてしか実験を行っていないため推測の域にとどまる。

4.1.2 降雨強度と侵食土量

降雨強度 I と侵食土量 E との関係について、Meyer の提案している式型 (8) と種田の提案している式型 (9) に従って解析を行なった。

$$\text{Meyer}; \quad E = C_I I^m \quad \dots\dots (8)$$

$$\text{種田}; \quad E = C_I(a + bI + cI^2) \quad \dots\dots (9)$$

解析の結果 (8) 式による定数は (10) 式のように求められた。

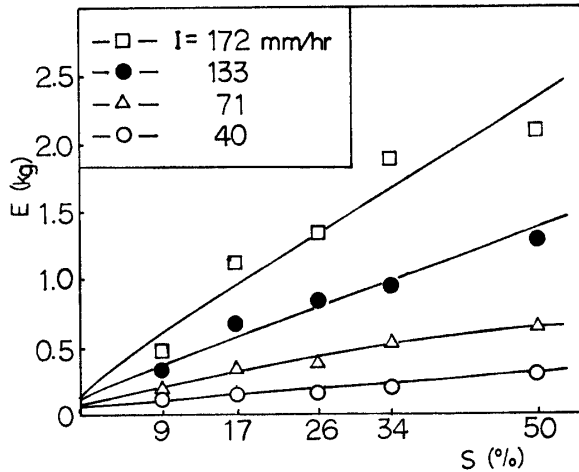


Fig. 5(a) Relationship between E and S.
(Solid lines are calculated by eq. (5))

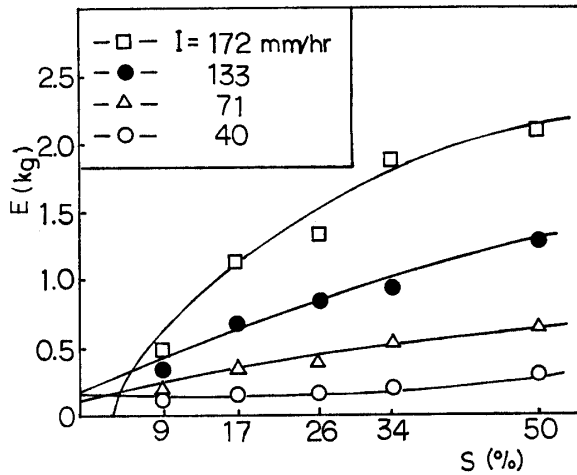


Fig. 5(b) Relationship between E and S.
(Solid lines are calculated by eq. (4))

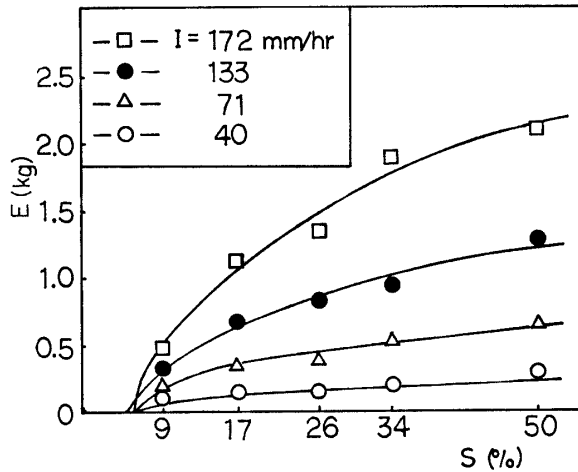


Fig. 5(c) Relationship between E and I.
(Solid lines are calculated by eq. (7))

$$\left. \begin{aligned} S=9\%, E=3.6I^{0.98} \\ S=17\%, E=1.2I^{1.32} \\ S=26\%, E=0.6I^{1.49} \\ S=34\%, E=0.75I^{1.50} \\ S=50\%, E=3.30I^{1.24} \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

この(10)式による計算結果を Fig. 6 (a) に実線で示す。なお比較のため(9)式の式型による結果を Fig. 6 (b) に実線で示すが両者の比較において $E=C_I I^m$ の式型の方がよい結果を与えている。

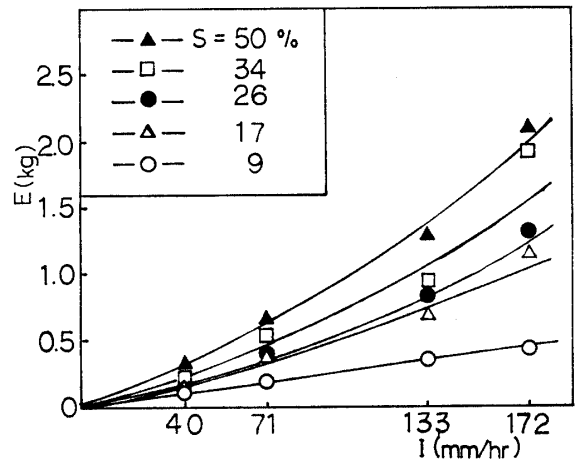


Fig. 6(a) Relationship between E and I.
(Solid lines are calculated by eq. (10))

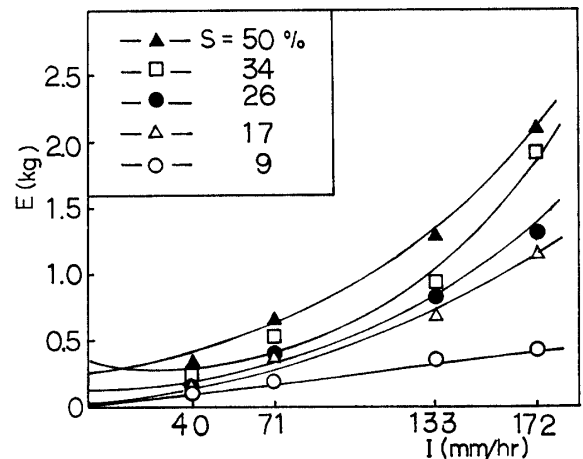


Fig. 6(b) Relationship between E and I.
(Solid lines are calculated by eq. (9))

4・1・3 傾斜および降雨強度と侵食量

(1) $E=C_S (A+B \log S)$ の変形

式(6)を $E=C_S B (\log S + A/B)$ なる形に書き換えて定数を求めると式(7)は式(11)のようになる。

$$\left. \begin{aligned} I=40 \text{ mm/hr: } E &= 226(\log S - 0.585) \\ I=71 \text{ mm/hr: } E &= 548(\log S - 0.614) \\ I=133 \text{ mm/hr: } E &= 1114(\log S - 0.650) \\ I=172 \text{ mm/hr: } E &= 1521(\log S - 0.729) \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

ここで $C_s B$ および A/B と I の関係を図示すると Fig. 7 のようにほぼ直線性を示す。そこで $C_s B$ および A/B を I の一次関数として $C_s = a_1 + a_2 I$, $A/B = b_1 + b_2 I$ とおき、最小二乗法により係数を求めると式 (12) となりこれを Fig. 8 (a) に実線にて挿入した。

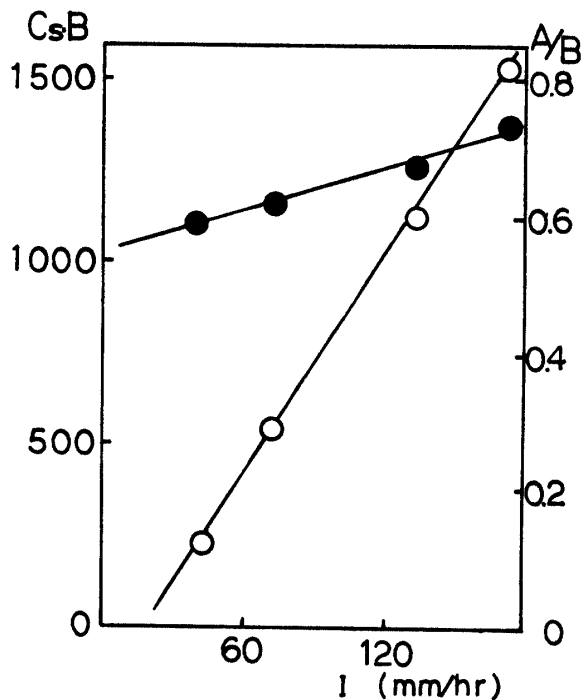


Fig. 7 Relationship between I and constants ($C_s \cdot B$, A/B).

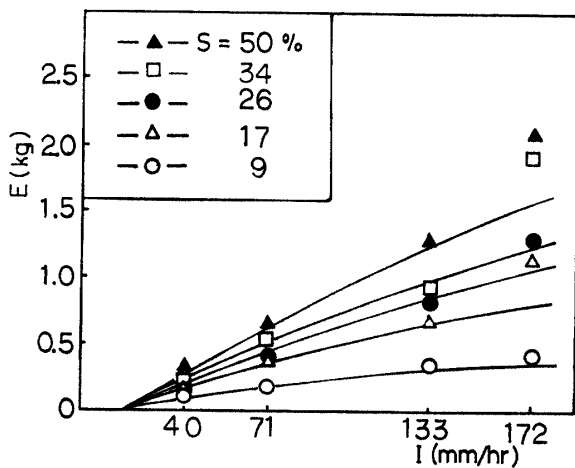


Fig. 8(a) Relationship between E and I .
(Solid lines are calculated by eq. (12))

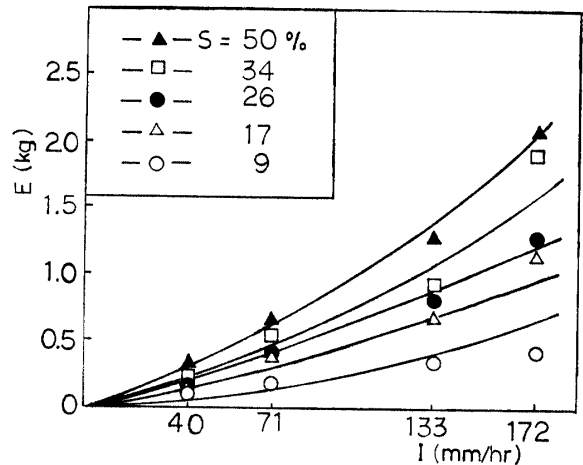


Fig. 8(b) Relationship between E and I .
(Solid lines are calculated by eq. (14))

$$E = -0.00979I^2 + (9.69 \log S - 5.08)I + (84.0 - 156 \log S) \dots (12)$$

(2) 重回帰解析

$$E = C_{IS} I^\alpha S^\beta \dots (13)$$

と置き重回帰分析を行なった結果は式 (14) のようになった。

$$E = 0.18I^{1.30}S^{0.66} \dots (14)$$

Fig. 8 (b) にその計算値を実線にて示した。

Fig. 8 (a) と Fig. 8 (b) を比較すると Fig. 8 (b) の方がデータの傾向をよく表わしているように思われる。

5. むすび

擬似降雨発生装置による 1 m 斜面からのマサ土の侵食実験により次のような定性的結果を得た。

(1) 表面流出土量・表面流出水量とも経過時間に伴って直線的に増加する。これは時間的変動がないことを示している。

(2) 表面流出土量 E_s は降雨強度の増大に伴って増加し、増加割合も降雨強度の増大につれて増加する。一方傾斜の増大につれて E_s は増加するが、その増加の割合は傾斜の増大につれて減少する傾向にある。

(3) 表面流出水量は、降雨強度の増大に伴ってほぼ比例して増加する。

(4) 表面流出水に含まれる土の割合は降雨強度が強いほど、傾斜が急なほど大きくなる。

(5) 流出土中の粗砂 (2.0~0.42 mm) は、降雨強度、傾斜にかかわらず粒径分布比は殆ど変わらない。細

砂の粒径分布比は傾斜の変化に対して変わらず，降雨強度の増大に伴って大きくなる．シルト以下分の粒径分布比は，降雨強度の増大に伴って減少するが，最も侵食を受けやすい．

(6) 傾斜，降雨強度と土壌侵食量との関係式として

$$E_s = 0.18I^{1.30}S^{0.66}$$

なる式を得た．

参 考 文 献

- 1) Wischmeier W. H. and Smith D. D.: Predicting Rainfall Erosion Losses, U. S. Dept. of Agr., **537**, 4 (1979)
- 2) 今尾昭夫：傾斜農地の侵食に関する研究：島根大学農学部研究報告，**12**, 135 (1978)
- 3) Meyer L. D. and Monke E. J.: Mechanics of Soil erosion by Rainfall and Overland Flow. Trans. ASAE, **8**, 572-577 (1965)
- 4) 種田行男：農地の土壌侵食量の子測：農業土木学会論文集，**56**, 8 (1975)

(昭和56年4月15日 受理)