

# 降雨強度と斜面長および傾斜角の土壌侵食量 におよぼす影響

藤原 輝男\*・宮園 隆弘\*\*・是枝 伸和\*\*

## The Influence of the Rainfall Intensity, Slope Length and Slope Steepness on Soil Erosion Rate

TERUO FUJIWARA, TAKAHIRO MIYAZONO and NOBUKAZU KOREEDA

### Abstract

For the purpose of making clear the mechanism of soil erosion, rate of eroded soil in keeping with the change of the rainfall intensity, slope length and slope steepness was measured about four kind of soils.

Erosion rate almost exponentially increases relatively to slope length, and also the relationship between erosion rate and slope steepness are almost linear so far as rill doesn't happen.

At so rill happens, the concentration of soil in water is almost constant without reference to the rainfall intensity and slope length, but increases with slope steepness increases.

Result of multiple regression analysis, we obtained following relation:

$$A = 0.97 K(L/5)^{1.40}(S/0.174)^{1.21}(278 + 100 \log_{10} I)^2$$

### 1. 緒 言

1945年に Wischmeier, Smith ら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量予測式 (Universal Soil Loss Equation: USLE)

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

(A: 年平均土壌侵食量, R: 降雨因子, K: 土壌因子, LS: 地形因子, C: 作物因子, 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た。

本実験は土壌侵食現象のメカニズムを解明するための一端として、降雨発生装置による人工的降雨を用いて、土壌侵食量の定性的傾向を求めるために行なったものである。本報は異なった4種類の土壌に対して、降雨強度・斜面長を変化させたときの土壌侵食量および降雨強度・傾斜角を変化させたときの土壌侵食量を測定してそれらの間の関係を求めたもので、土壌侵食量予測式中の各因子の数値を決定するための基礎研究

として、5m 斜面を用いて LS 値, K 値の解析を試みた。

### 2. 実験装置および方法

実験室内に取り付けた降雨発生装置 (Fig. 1) により、床面にセットした試料土に人工的に降雨を与えて実験を行なった。実験斜面から降雨発生装置までの高

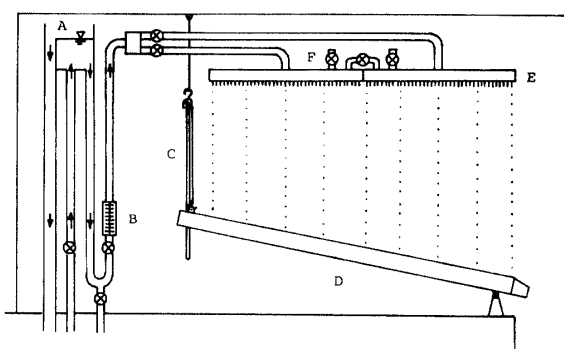


Fig. 1 Rainfall simulator.

A: Water tank B: Float level gage C: Chain block D: Soil tank E: Rainfall simulator F: Air valve

\* 土木工学科

\*\* 大学院土木工学専攻

さは約 5m で、降雨発生装置はバルブ操作により自由に降雨強度を変えることができる。雨滴の形成は降雨発生装置の貯水槽に水を貯めて、貯水槽底部にある 6cm ピッチの針状の管から水を噴出させて雨滴を発生させる。雨滴を均等に分散させるために下方に 5mm のネットが二段に張ってある。Photo. 1 は貯水槽および分散ネットの写真である。

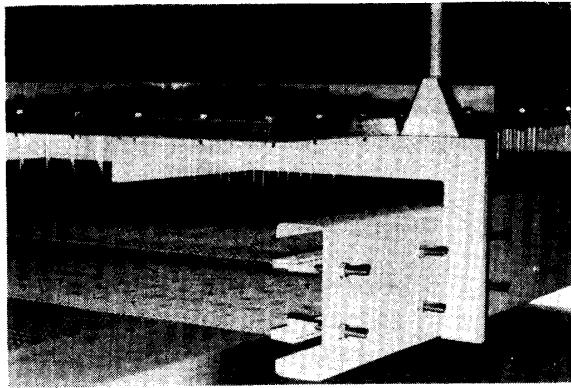


Photo. 1 Rainfall simulator.

試料土は 2mm のフルイを通過したマサ土（フルイマサ土）とフルイ分けをしていないマサ土（自然マサ土）、および 2mm のフルイを通過した粘性土（フルイ粘性土）とフルイ分けをしていない粘性土（自然粘性土）の 4 種類を用いた。乾燥密度が  $1.4\text{g/cm}^3$  になるように含水比から土壌の重量を計算したものを長さ 5m、幅 50cm、深さ 5cm の実験用土槽に詰め、17.5kg ローラーで転圧した後、表面をストレートエッジで成形した。

各土壌共、傾斜角  $10^\circ$  ( $S=17\%$ ) の場合につき、降雨強度を 45, 60, 75, 90mm/hr の 4 段階、斜面長を 2, 3, 4, 5m の 4 段階、その組み合わせ 16 通りについて実験を行なった。またフルイマサ土、フルイ粘性土については斜面長を一定 ( $L=3\text{m}$ ) にし、降雨強度を 45, 60, 75, 90mm/hr の 4 段階、傾斜角を  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$  ( $S=9, 17, 26, 34\%$ ) の 4 段階、その組み合わせ 16 通りについて実験を行なった。

実験方法としては降雨発生装置からの人工的降雨が所定の降雨強度に安定した後実験を開始し、実験開始後 1 時間で降雨を停止させて実験を終了する。その後収集した濁水の重量を計り、沈澱を待って上澄み水を除き、乾燥させた後土壌の重量を測定し表面流出土量および表面流出水量を求めた。

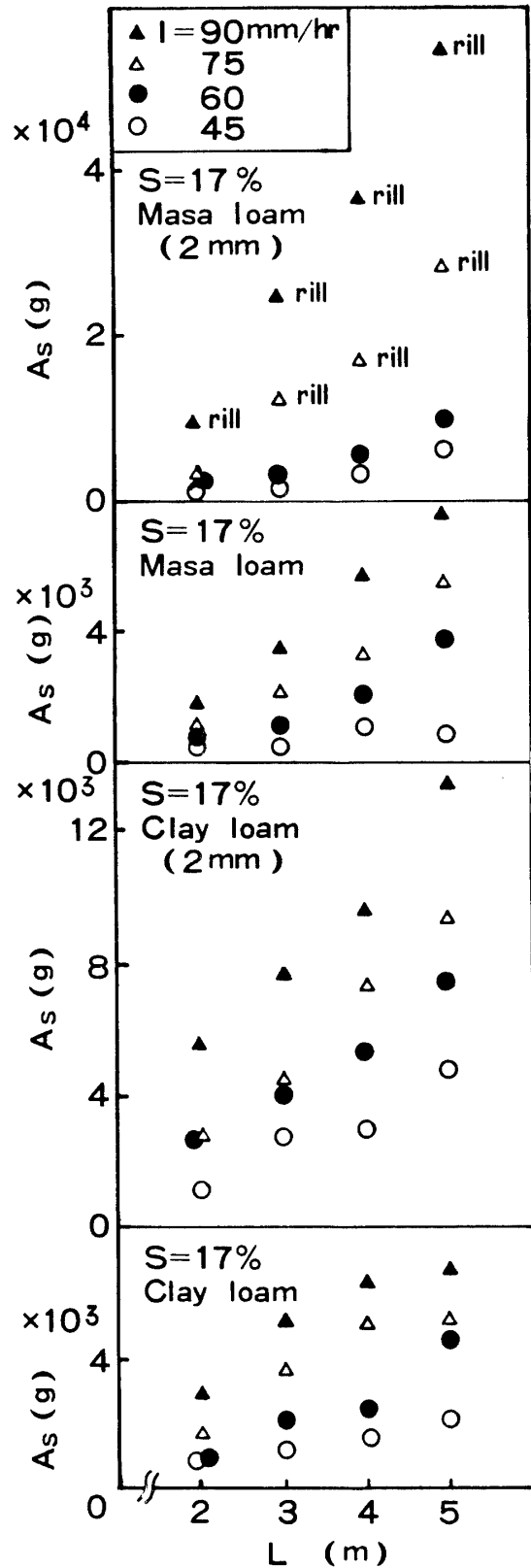


Fig. 2 Relationship between  $A_s$  and  $L$  ( $S=17\%$ ). ( $A_s$ : Weight of eroded soil,  $L$ : Slope length,  $S$ : Slope  $I$ : Rainfall intensity)

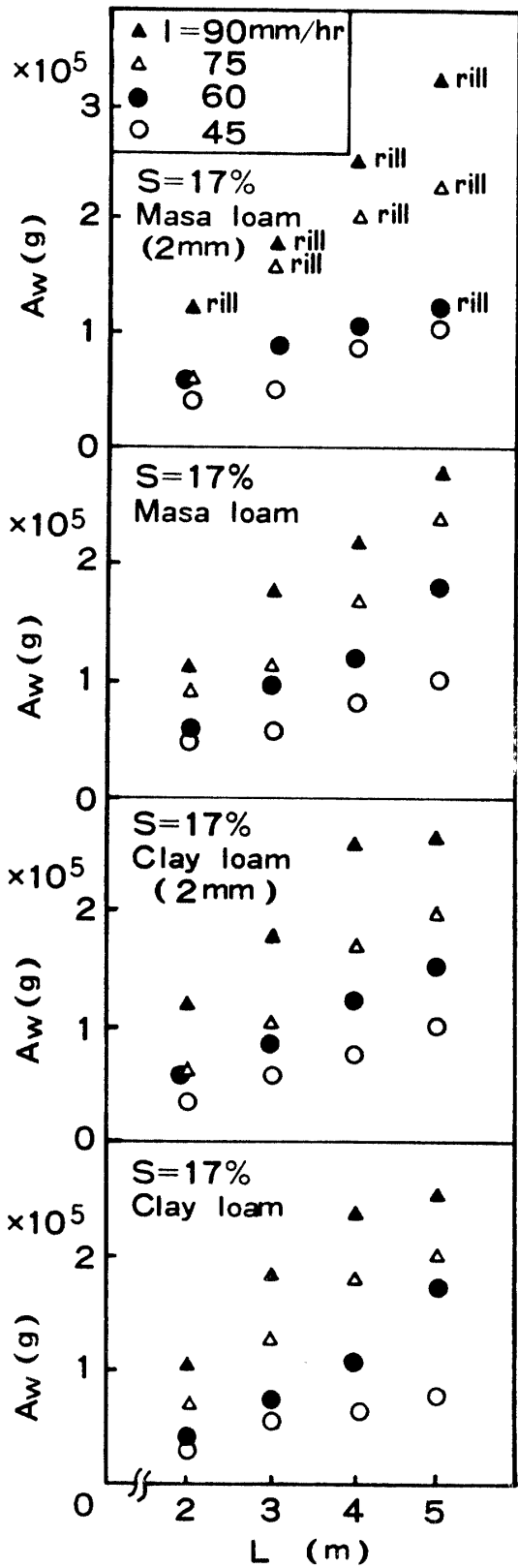


Fig. 3 Relationship between  $A_w$  and  $L$  ( $S=17\%$ ).  
 ( $A_w$ : Weight of surface flow)

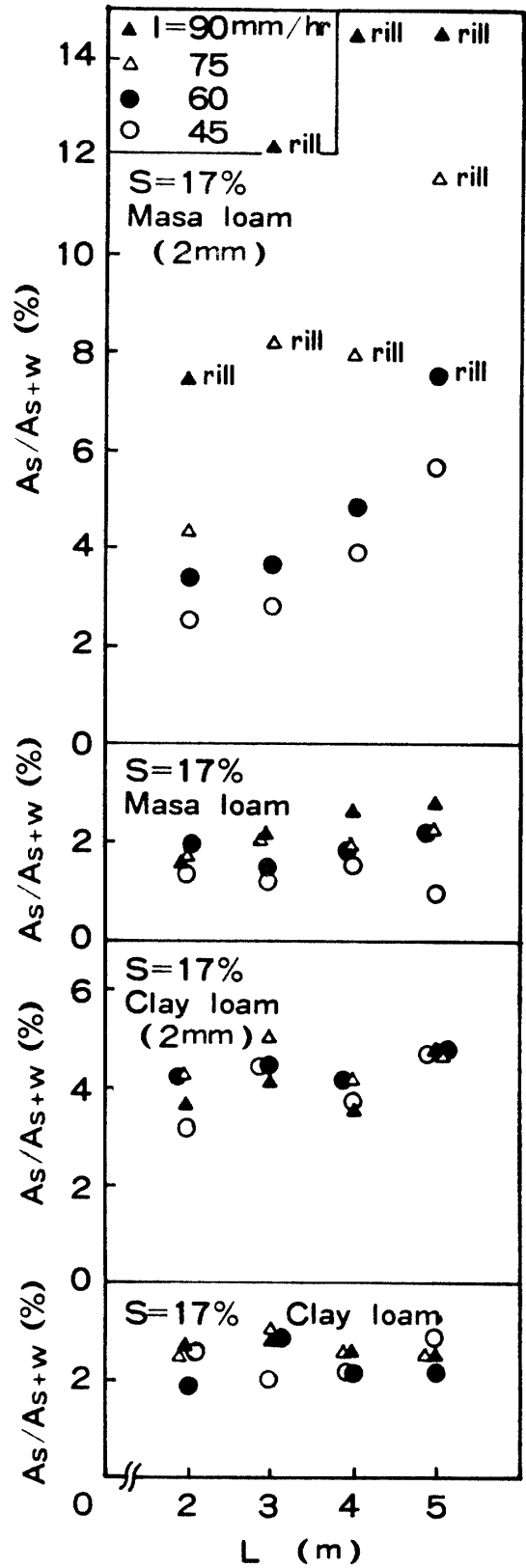


Fig. 4 Relationship between  $A_s/A_{s+w}$  and  $L$  ( $S=17\%$ ).  
 ( $A_{s+w}$ : Weight of eroded soil and surface flow)

### 3. 実験結果

#### 3.1 斜面長特性

##### 3.1.1 侵食土量

Fig. 2 に土壌ごとの降雨強度  $I$ , 斜面長  $L$  と流出土量  $A_s$  の関係を示す。これらの図より  $A_s$  は斜面長に比例してやや指数関数的に増加する傾向が見られ、同一の降雨強度の下では単位斜面長当りの侵食土量はマサ土については斜面長の増大につれてやや増加する傾向にあるが、粘性土の場合にはほぼ一定値を示す傾向が見られた。

各土壌について比較するとフルイマサ土の場合、高降雨強度ではリルが発生したため、他の土壌に比べて  $A_s$  の値が 10 倍近くにもなっている。このように同じマサ土で他が同じ条件の場合でも、粗粒子を含んだ自然マサ土ではリルが発生しないのに比べて、2mm のフルイマサ土ではリルが発生して 10 倍近くの侵食量を示した。このことからマサ土で粗な土粒子を含む場合はリルが発生しにくい傾向を持つ。自然粘性土について見ると、他の 3 つの土壌の場合斜面長が増加するにつれて、侵食土量の増加割合もやや増すのに対して、この土壌ではわずかながら減少していく傾向が見られた。

##### 3.1.2 表面流出水量

Fig. 3 に土壌ごとの降雨強度  $I$ , 斜面長  $L$  と表面流出水量  $A_w$  の関係を示す。 $A_w$  は  $A_s$  同様、斜面長に比例してほぼ直線的に変化し、単位斜面長当りの  $A_w$  は各降雨強度ごとにそれぞれほぼ一定の値を示す傾向が見られた。

##### 3.1.3 $A_s/A_{s+w}$

Fig. 4 に土壌ごとの降雨強度  $I$ , 斜面長  $L$  と濁水中に含まれる流出土量の濃度  $A_s/A_{s+w}$  の関係を示した。フルイマサ土以外の土壌については、多少の差はあるが斜面長、降雨強度に関係なく濃度はほぼ一定になるという傾向が見られ、フルイマサ土については濃度は斜面長と降雨強度の増加につれて増加しているが、これは明らかにリル発生による侵食のためと思われる。

### 3.2 傾斜角特性

#### 3.2.1 侵食土量

降雨強度  $I$ , 傾斜角  $S$  と流出土量  $A_s$  の関係を Fig. 5 に示す。フルイ粘性土の場合、 $A_s$  は傾斜角に比例してほぼ直線的に変化する傾向を示しているが、フルイマサ土では  $A_s$  は傾斜角の増大に伴って増加割合もやや増加する傾向が見られる。これはリル発生のため

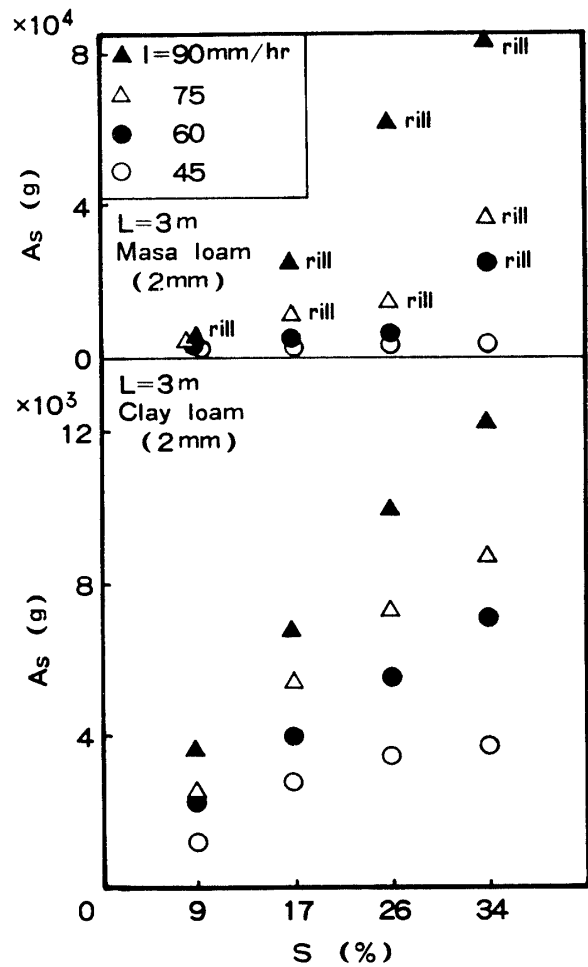


Fig. 5 Relationship  $A_s$  and  $S$  ( $L=3$  m).

めでリルの発生しない場合と比較してやや異なった傾向を示す。

#### 3.2.2 表面流出水量

表面流出水量  $A_w$  と降雨強度、傾斜角の関係を Fig. 6 に示す。 $A_w$  は傾斜角増大に伴って直線的に増加しているが、その増加割合は小さい。 $A_w$  は傾斜角に関係なく同一の降雨強度の下では一定であると見なすべきであるが、傾斜角の増大に伴ってやや増加の傾向が見られるのは側方への飛散土量が減少するためではないかと思われる。

#### 3.3.3 $A_s/A_{s+w}$

Fig. 7 に降雨強度、傾斜角と濃度  $A_s/A_{s+w}$  の関係をプロットした。フルイマサ土の場合はリルが発生し、そのため濃度は傾斜角と降雨強度の増大につれて急激に増加し、フルイ粘性土では濃度は傾斜角の増大につれてわずかに増加するが降雨強度による差はほとんど見られない。以上よりリルが発生しない限り侵食土壌の濃度は降雨の強弱に関係なく一定で、傾斜角の変化による影響もあまり強くないことがわかり、リルが発

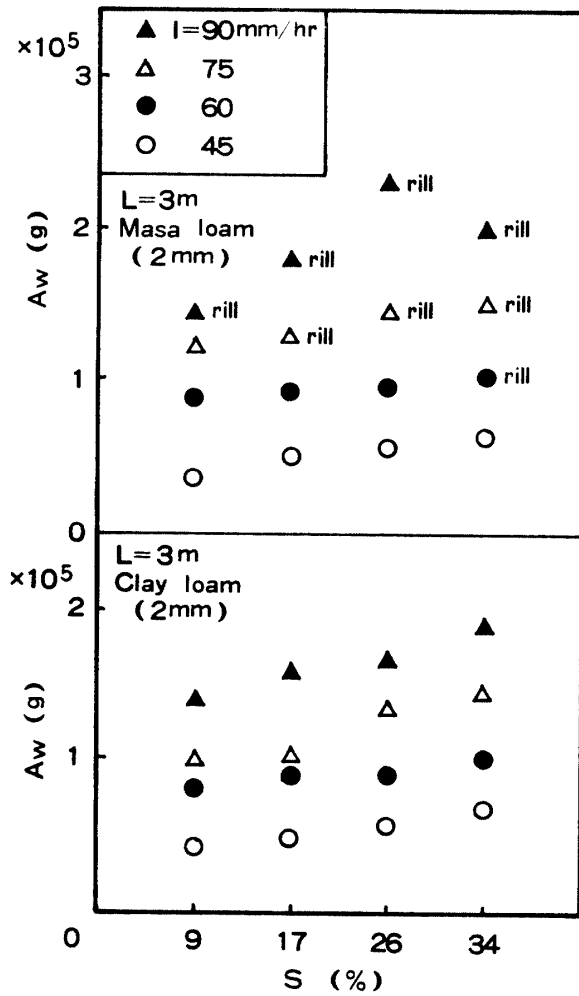


Fig. 6 Relationship  $A_w$  and  $S$  ( $L=3m$ ).

生すると傾斜角，降雨強度が大である程侵食土の濃度は急激に濃くなる。

#### 4. 解析

これらのデータを用いて降雨強度，傾斜角，斜面長と侵食土量の間関数関係についての回帰分析の検討を加えてみる。

##### 4.1 USLE 式

流出土量を求める式として (1) 式を用いる。

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad \dots (1)$$

本研究では作物因子  $C$ ，保全因子  $P$  は 1 とした。

##### 4.1.1 降雨因子 $R$

本研究で用いた降雨発生装置における雨滴分布から求めた雨滴の運動エネルギーの式は次式のようになり

$$KE = 278 + 100 \log_{10} I$$

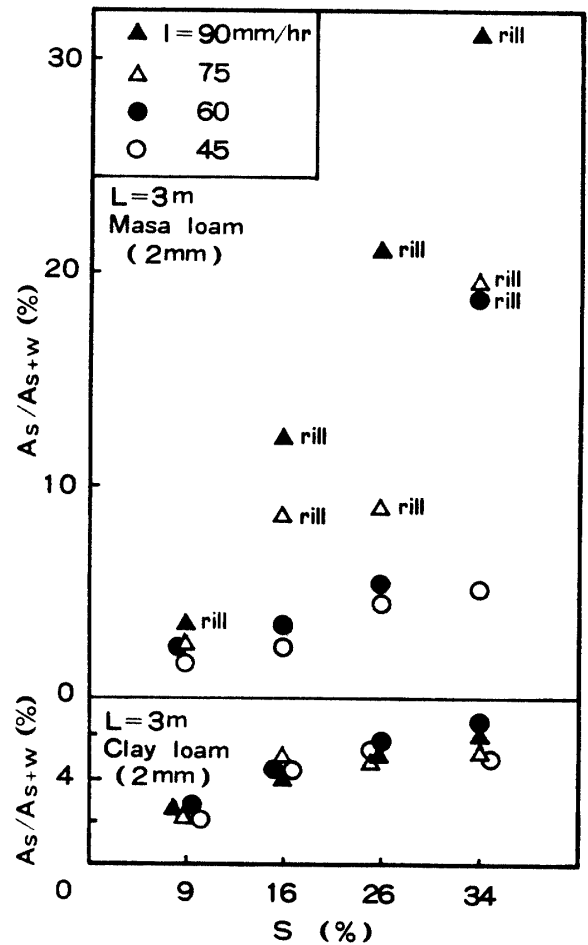


Fig. 7 Relationship  $A_s/A_{s+w}$  and  $S$  ( $L=3m$ ).

$KE$ : 降雨運動エネルギー (ton·m/ha·cm)

$I$ : 降雨強度 (cm/hr)

したがって降雨全体の  $R$  値は (2) 式で表わされる。

$$\begin{aligned} R &= \Sigma E \cdot I \\ &= KE \cdot T \cdot I^2 / 100 \\ &= I^2 (278 + 100 \log_{10} I) \quad \dots (2) \end{aligned}$$

$E$ : 降雨エネルギー (ton·m/ha)

$T$ : 降雨継続時間 (hr)

$R$ : 降雨因子 (Newton/hr)

##### 4.1.2 地形因子 $LS$

地形因子  $LS$  は斜面長  $L=5m$ ，傾斜角  $S=17\%$  の地形を基準にした侵食土量比を  $LS$  値として

$$\begin{aligned} LS &= A/A_0 \\ &= C(L/L_0)^m \cdot (S/S_0)^{n-3} \end{aligned}$$

$L$ : 斜面長， $S$ : 斜面勾配

$C, m, n$ : 定数

$A$ :  $L, S$  に対応する侵食土量  
 $L_0, S_0, A_0$ : 標準斜面の斜面長, 傾斜角, 侵食土量

を用い, 全実験データの重回帰分析より

$$LS = 0.97(L/5)^{1.40} \cdot (S/0.174)^{1.21} \quad \dots\dots (3)$$

なる解析結果を得た.

4.1.3 土壌因子  $K$

$K$  値は次式によって求めた値を平均することで与えられる.  $R$  は降雨強度  $I$  との関係式 (2) から求め,  $LS$  は (3) 式による計算値を用い, それぞれの侵食土量の測定値  $A$  とから (4) 式によりそれぞれの土壌の  $K$  値を求めた.

$$K = A/R \cdot LS \quad \dots\dots (4)$$

計算結果を示すと Table 1 のようになる.

Table 1 K value

Soil	K value
Masa loam (2 mm)	1.08
Masa loam	0.24
Clay loam (2 mm)	0.59
Clay loam	0.33

4.1.4 USLE 式

侵食土量は (2) (3) (4) 式より次の関数形で表わされる.

$$A = 0.97 \cdot K(L/5)^{1.40} \cdot (S/0.174)^{1.21} \cdot (278 + 100 \log_{10} I) \cdot I^2 \quad \dots\dots (5)$$

これが 5m 斜面における 土壌損失予測式である.

4.2 USLE 式の検討

(5) 式に  $K$  の値を代入してフルイマサ土, フルイ粘性土の斜面長特性, 傾斜角特性についての計算値を Fig. 8 (a) (b) (c) (d) に実線にて示した. フルイマサ土についてはリルが発生したため, 計算値より実測値の方がかなり上まわっていることがわかる. またフルイ粘性土では降雨強度の増大に伴って適合しなくなるが, これはリルが発生しなかったため, リル侵食を含んで求めた (5) 式による計算値と比較すると小さな値を示す.

リル侵食を含むものとそうでないものを分け, リル侵食もその発達の程度によって分類し, それぞれのケースについて検討する必要があると思われる.

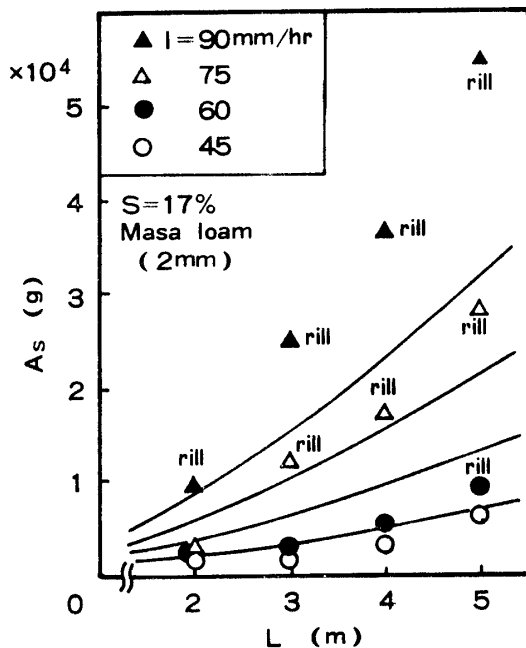


Fig. 8(a) Relationship between  $A_s$  and  $L$  ( $S=17\%$ ).  
 (Solid lines are calculated by eq. (5))

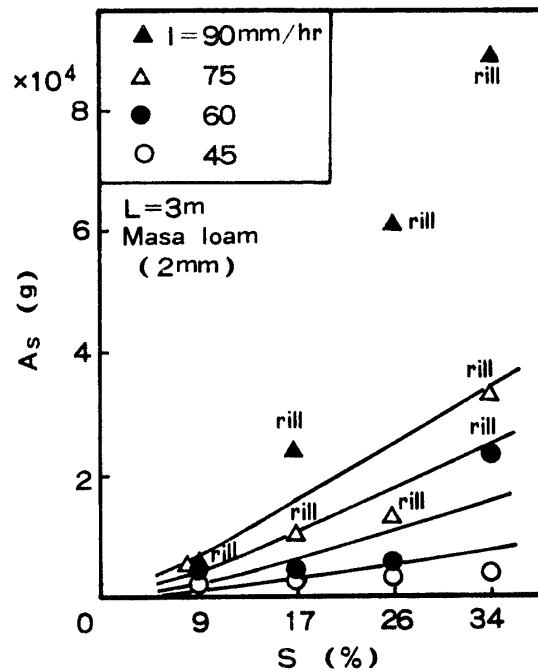


Fig. 8(b) Relationship between  $A_s$  and  $S$  ( $L=3m$ ).  
 (Solid lines are calculated by eq. (5))

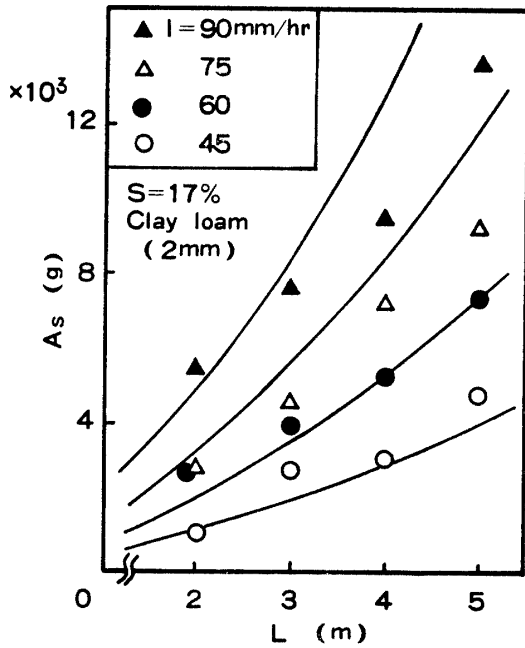


Fig. 8(c) Relationship between  $A_s$  and  $L$  ( $S=17\%$ ). (Solid lines are calculated by eq. (5))

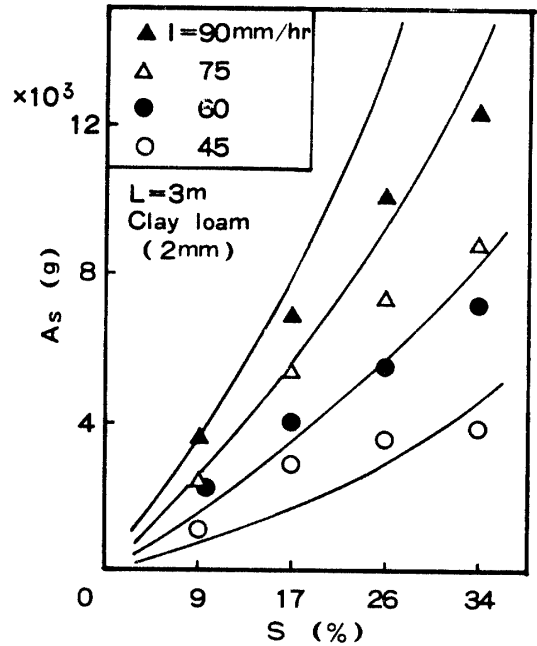


Fig. 8(d) Relationship between  $A_s$  and  $S$  ( $L=3m$ ). (Solid lines are calculated by eq. (5))

5. むすび

擬似降雨発生装置による 5m 斜面からのフルイマサ土, 自然マサ土, フルイ粘性土, 自然粘性土の侵食実験より次のような結果を得た。

- (1) 表面流出土量は斜面長に比例してやや指数関数的に増加する傾向が見られる。
- (2) 表面流出水量は斜面長に比例してほぼ直線的に増加する傾向が見られる。すなわち単位斜面長当りの表面流出水量はほぼ一定となる傾向がある。
- (3) リルが発生しない間は, 表面流出土量は傾斜角の増大に伴ってほぼ直線的に変化する。リルが発生すると表面流出土量の増加割合は傾斜角の増大に伴って増加する傾向がある。
- (4) 表面流出水量は傾斜角の増大に伴ってほぼ直線的に増加する。
- (5) リルが発生しない間は濃度は同一の土壤については斜面長, 降雨強度に関係なくほぼ一定で, 傾斜角の増大につれて増加する傾向がある。
- (6) リル発生の場合, 濃度は降雨強度が強いほど,

傾斜が急なほど, 斜面が長いほど大きくなる。

(7) 5m 斜面からの土壤侵食量予測式として

$$A = 0.97 \cdot K \cdot (L/5)^{1.40} \cdot (S/0.174)^{1.21} \cdot (278 + 100 \log_{10} I) \cdot I^2$$

なる式を得た。

(8) 土壌係数  $K$  として以下の値を得た。

- フルイマサ土……… $K=1.08$
- 自然マサ土……… $K=0.24$
- フルイ粘性土……… $K=0.59$
- 自然粘性土……… $K=0.33$

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) 藤原輝男・山本晃: 擬似降雨による土壤侵食のメカニズム——表面流水による侵食——: 山口大学工学部研究報告, **32**, 1(1981)
- 3) Kuk Kwang Cho: Soil Erosion on Upland Flow Slopes, Seoul National University, (Feb. 1981)

(昭和 57 年 4 月 20 日 受理)