

乱した土の初期水食性

内 田 勝 利*

Erodibility of Disturbed Soils Related to Erosion
from the First Stage of Rainfall

Katsutoshi UCHIDA

Faculty of Agriculture, Kyushu University

I ま え が き

水食に影響する因子は非常に多く、また変化する。それゆえに各々の因子が水食に及ぼす影響について、特に自然状態で明らかにすることは難しい。盛土斜面において、土壌侵食を支配している諸因子のうち、斜面勾配、降雨の性質、土の性質等が最も重要である。室内における実験では、斜面勾配、降雨の性質は自由に制御できる因子であり、土はその物理的並びに化学的諸性質、地表面の状態及び地力において幅広く変化するものである。それゆえ実験に使用する土の種類によってその水食量は異なり、試料土の選択が問題となる。そこで水食性が大きいといわれている火山灰土のシラス、クロボク、沖縄地方において海洋汚濁として問題となっている国頭マージ、また幾多の水食災害をもたらしているマサなどを選択した。この他に高粘土分の土である八草土（カオリン）を使用した。

本報は、初期水食が斜面の水食態様を決定するとし、水食を支配する要因——斜面勾配、降雨強度並びに表面流出水量——を用いて、乱した土の初期水食の挙動を明らかにしようとした。

II 実験装置と方法

土の初期水食の実験には、斜面長30cm、幅10cm、深さ

5cmの土槽と、tubing tip法による降雨装置を用いた。実験土槽は下層土として2cm厚さに砂（透水係数 1.28×10^{-2} cm/s）を敷設し、その上に試料土を上層土として2cm厚さに充填した。その後、土槽を水平にして下流端の排水孔より給水し、飽和させた後、24時間放置し排水した。

実験は斜面勾配を $2 \sim 35^\circ$ まで変化させ、降雨強度を $7.5 \sim 110.8$ mm/hの範囲にて非排水状態の下で行った。実験開始後5分毎に懸濁水を30分後まで採取した。なお実験中に下層土が露出した時は、直ちに実験を中止し、それまでに流出した水食量を測定した。

試料土は粘質土の八草土（カオリン）、国頭マージ、砂質土の福間マサ、火山灰土の鹿児島シラス、関金クロボクで、それぞれの物理性は表-1に示されている。人工降雨の性質については、落下高さが平均6.95mであり、雨滴径はウォーターブルー紙法により求めた。雨滴の頻度分布を図-1に示す。これら実験における最大雨滴径は4.16mmであり、Laws¹⁾の実験結果より、この雨滴の速度 8.25 m/sは、終速度の92.2%に達している。図-1に示す降雨強度 $26.3 \sim 84.5$ mm/hの降雨エネルギーは、 $161.06 \sim 616.86$ erg/cm²・sであり、三原²⁾の式を用いると、これら降雨強度での自然降雨エネルギーは、 $216.4 \sim 898.84$ erg/cm²・sとなる。従って本報の水食実

表-1 試料土の物理性

試料名	粒度組成			比重	コンシステンシー			有機物含有量	土の分類名	採取場所
	砂	シルト	粘土		液性限界	塑性限界	塑性指数			
八草土	1.0	30.5	68.5	2.644	100.5	25.7	74.8	0.4	粘土	
福間マサ	59.0	24.5	16.5	2.661	36.2	15.3	20.9	2.4	砂質ローム	福岡県宗像郡福岡町
鹿児島シラス	75.0	19.0	6.0	2.417		N.P.		0.0	砂質ローム	鹿児島市
関金クロボク	52.7	30.8	16.5	2.319	91.7	75.8	15.9	25.4	砂質ローム	鳥取県東伯郡関金町
国頭マージ	43.0	20.0	37.0	2.717	36.7	22.3	14.4	0.0	粘土	名護市寄合原

*九州大学農学部

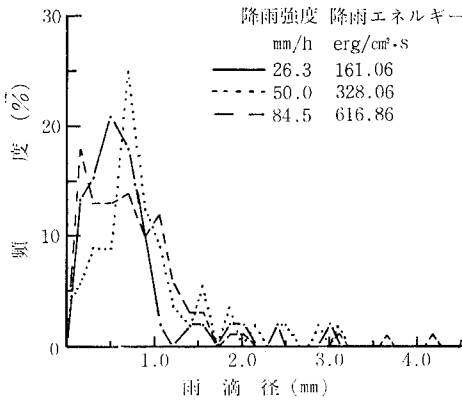


図-1 雨滴の頻度分布

表-2 試料土の初期条件

試料名	乾燥密度 g/cm ³	含水比 %	飽和度 %
八草土	0.812~1.008	58.1~70.7	82.9~94.6
福岡マサ	1.172~1.419	29.3~34.5	72.3~89.0
鹿児島シラス	1.071~1.123	38.5~39.2	75.4~80.7
関金クロボク	0.573~0.616	97.7~102.5	78.0~82.0
国頭マージ	1.172~1.230	35.2~36.7	72.2~82.0

験は自然降雨のエネルギーの約70%に相当することになる。なお実験前の試料土の乾燥密度、含水比、飽和度を表-2に示す。

III 結果と考察

水食実験結果を検討するうえで、土の初期水食量としてどのような値を用いるかは大切な事である。田中³⁾は侵食量時間曲線より曲線の極大値に当たる最大侵食量を選択している。筆者は水食が与えられた水量の多少により生ずるものと考え、任意の時間、供給された水に対する流出土容積(流出土重量/乾燥密度)の比として初期水食量(E_t , mm³/cc)をあらわす。

(1) 初期水食現象

水食災害は初期の水食に支配されると考えると土の初期水食現象が重要な問題となる。図-2に勾配4°, 8°, 14°の場合について各試料土の水食量の時間経過における変化を示す。この図に示したように、初期水食量には3つの水食現象が考えられる。鹿児島シラスにて説明すると、次のようである。A型は流出初期に多量の水食量を示し、その後漸減し、一定状態にいたる。B型は流出開始後、徐々に水食量が増加し、ある時間に最大となり、その後緩やかに減少し、一定状態になる。C型は水食量が10mm³/ccとあまり大きくなく、30分後には一定の水食量を示す。このように土の初期水食現象はその勾

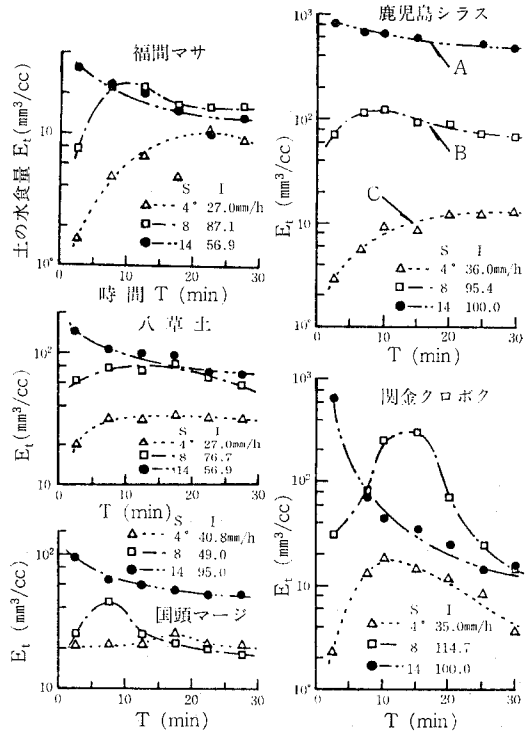


図-2 土の水食量の時間的变化

配、降雨強度等によって大きく変わってくる。そして、土の初期水食量はA>B>Cの順となる。

図-2において、八草土では14°勾配にてA型を生じ、4°勾配、27.0mm/h降雨強度ではB型の傾向を示しており、これらの勾配、降雨強度以下にならないとC型はあらわれない。福岡マサでは、14°勾配、56.9mm/h降雨強度においてA型に近い状態を示してはいるが、14°を越える勾配あるいは60mm/h以上の条件にならないと完全なA型とはならない。関金クロボクでは、A型で流出初期に多量の水食量を生じ、その後急激に減少する。このことがシラスよりクロボクの水食量が少ない一因と考える。B、C型でも同様な勾配、降雨強度において、その水食量の変化はシラスよりクロボクの方が激しい。またクロボクの水食量は一時的なものであり、シラスの水食現象は高水準の流出土が長時間持続する水食だと考えられる。それゆえにシラスの盛土斜面では、勾配4°未満に至るまで水食が激しく続くと推測する(図-4)。

(2) 初期水食量と降雨強度及び勾配

初期水食量と降雨強度、勾配との関係は図-3のようになる。各試料土とも初期水食量と降雨強度との間には両対数紙上で直線関係が認められる。

i) 八草土

勾配4°と8°との間に、土の水食量に変化がみられるが、降雨強度が大になると水食量の差がなくなる傾向が

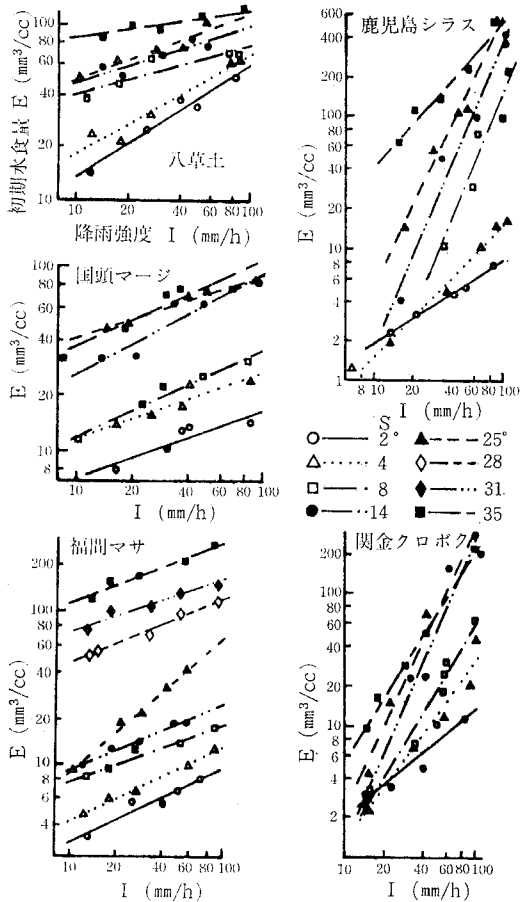


図-3 初期水食量と降雨強度との関係

ある。他の試料土と比較して、降雨強度、勾配の変化に対する水食量の変化は小さい。八草土は粘土分に富み、低透水性の土であり、緩勾配における水食は雨滴による飛沫侵食と、そのせん孔への湛水現象による懸濁化によるものである。急勾配では雨滴による土の分離と掃流力により侵食が起るので、降雨強度が大きくなると、水1ccにおける流出土容積には差異があまりないことになる。また35°勾配では、水食量は降雨強度の大小に関係がなくなり、80~100mm³/ccの値を示す。

ii) 国頭マージ

八草土と似た傾向を示し、各勾配の降雨強度と水食量との関係を示す直線の勾配は緩やかであり、それら直線は八草土より幅広く分布する。また勾配8°以下と14°以上において、土の水食量に違いがみられ、勾配14°以上になると勾配の増加に対し、水の単位体積あたりに含まれる流出土には、差異がなくなる傾向があり、多量の流出土を生じる。

iii) 福間マサ

勾配14°までは20mm³/cc以内の水食量を示し、ほとん

ど違いがみられないが、25°勾配を越えると土の水食量は急増する。特に35°勾配になると、降雨強度の大小にかかわらず多量の流出土を生じ、水食災害の誘因となる可能性を含んでいる。これは福間マサが低粘着性の土であり、急勾配になると掃流力の増加とともに、土粒子が下方へ移動し易くなるためと考えられる。

iv) 関金クロボク

2°勾配を除いて土の水食量と降雨強度は類似の直線傾向を示し、14°勾配以上ではあまり差異がみられなくなり、流出土量は相当大きくなる。

v) 鹿児島シラス

8°勾配以上では降雨強度の増加につれ土の水食量が急増する。また勾配による変化も大きく、8°以上の勾配では長雨あるいは豪雨時には水食災害が予測され、危険勾配である。特に35°勾配の盛土斜面では、地表流が流れ出す程度の降雨があると多量の流出土を生じる。

次に図-3を用いて、50mm/h降雨強度での各試料土の初期水食量の予測値を求め、勾配の変化と初期水食量の関係について検討する。勾配と初期水食量との関係を図-4に示す。図から明らかなように、福間マサ、鹿児島シラスは他の試料土とは異なる特徴を示している。すなわち福間マサでは、初期水食量が勾配の変化に鋭敏であり、勾配25°までは他の4試料土より水食量は少ないが、勾配25°を越えると急増している。これは25°以下の

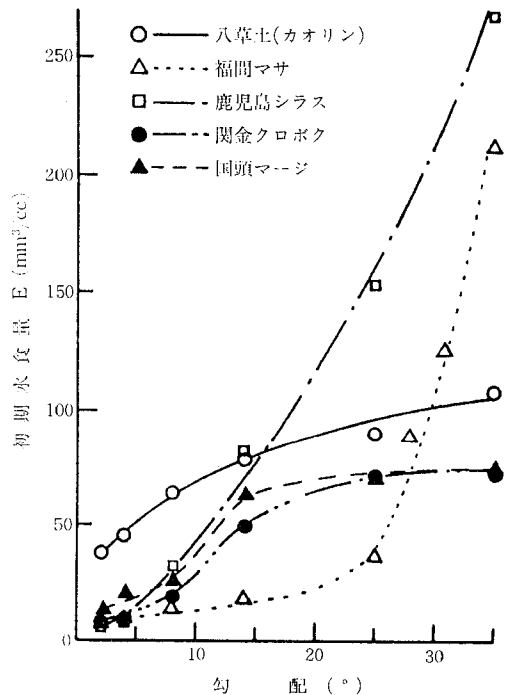


図-4 初期水食量と勾配との関係 (I=50.0mm/hの場合)

表一3 各試料土における a, b, c, K の値

試 料 名	a	b	c	K	決定係数	F
八 草 土	0.424	0.382	0.028	1.003	0.905	82.326***
福 間 マ サ						
0° < S ≤ 25°	0.512	0.058	0.462	67.230	0.965	195.170***
25° < S ≤ 35°	3.784	0.118	0.255	0.001	0.961	91.458***
鹿 児 島 シ ラ ス	1.279	0.268	1.102	827.154	0.936	137.552***
関 金 ク ロ ボ ク	0.712	1.223	0.376	0.460	0.887	73.254***
国 頭 マ ー ジ	0.652	0.195	0.274	21.088	0.934	121.877***

*** 0.5%水準で有意

斜面では、流出土が少なく安定しているが、勾配が25°を越える盛土斜面では、水食災害を引起す可能性をはらんでおり、裸地であれば危険斜面だと考えられる。従って、何らかの土地保全対策が必要である。また鹿児島シラスの盛土においては勾配4°以上になると、初期水食量が急増する。急勾配において、シラスの流出土は福岡マサのそれよりも多い。関金クロボクと国頭マージは同傾向を示し、勾配14°までは水食量が大きく増加するが、14°を越えると緩やかな増加となる。八草土の水食量は勾配の増加とともに漸増する。

(3) 初期水食量の予測

初期水食量に影響する水食因子としては、降雨強度、斜面勾配、表面流出水量及び斜面長等が考えられる。

Neal⁴⁾は降雨強度と侵食量との関係を(1)式で示した。

$$E = K S^{0.7} I^{2.2} \dots \dots \dots (1)$$

E : 侵食量 (Ib / $\frac{1}{1000}$ acre)

K : 定数 = 0.4

S : 勾配 (%)

I : 降雨強度 (in/h)

また田中⁵⁾は急斜面における流下水と侵食量の実験式として(2)式を示している。

$$E = K q^a S^b \dots \dots \dots (2)$$

E : 最大侵食量 (g/sec · m²),

q : 表面流出水量 (cc/sec · m²),

S : 0.5 ~ 0.2, a : 0.48 ~ 1.2, β : 1.1 ~ 0.7,

K : 0.01 ~ 0.002,

(1), (2) 式より筆者は土の初期水食量と降雨強度、勾配並びに表面流出水量の一般式を(3)式であらわした。

$$E = K S^a I^b q^c \dots \dots \dots (3)$$

E : 初期水食量, mm³/cc,

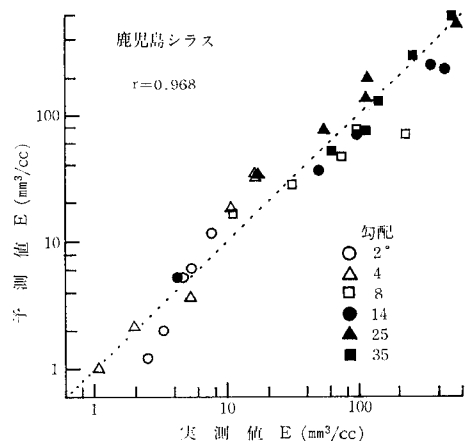
S : 度, I : mm/h, q : cc/s · cm²,

5試料土に対して、S, I, qを説明変数とし、土の初期水食量を目的変数として重回帰分析を行い、a,

b, c, Kを求める。表一3にそれらの値を示す。5試料土とも決定係数0.8以上であり、0.5%水準で有意であった。

aの値は福岡マサ(25° < S ≤ 35°)の3.784から八草土の0.424まで変化し、福岡マサの25°を越える斜面が最も勾配変化に対してa値は影響を受けるが、このことは福岡マサの緩急斜面における水食量の大きな相違によるものであり、特殊な例であると考えられ、一般的には、シラスの1.279から八草土の0.424の範囲に入るものと考えられる。bの値は、関金クロボクが最も降雨強度の変化に対して影響を受ける、そして表面流出水量に対しては、シラスの1.102から八草土の0.028であった。

5試料土のうち八草土、国頭マージは粘土、福岡マサ、鹿児島シラス及び関金クロボクは砂質ローム土であるから、粘質土から砂質土の範囲を含んでいる。従って、一般の土に対するS, I, qの指数a, b, cの値は、それぞれ0.424~1.279, 0.058~1.223, 0.028~1.102の範囲内に入るものと考えられる⁶⁾。鹿児島シラスについて、(3)式による初期水食量の予測値と実測値との関係を図一5に示す。



図一5 Eの予測値と実測値

IV 要 約

水食の態様が初期水食に起因するとの観点から、乱した土の初期水食量と降雨性質、斜面勾配との関係を検討した。特に、火山灰土においては、これら因子の影響を大きく受けることが推測された。火山灰土としてシラス、クロボクとその他にマサ、八草土（カオリン）、マージの初期水食量と降雨強度、勾配及び表面流出水量との関係から各々の試料土の特徴について述べた。

シラス、マサの水食量は勾配の変化に鋭敏で、シラスは5試料中水食が最も激しい。マサは勾配25°を越えると水食量は急増し、35°以上でシラスと同程度の水食を受けるが、勾配20°程度まではクロボク、マージの方が微粒子が流出し初期水食量が大きい。各試料土について一般的な初期水食量を(3)式であらわした。

最後に、本研究をまとめるに当たり、懇切なるご教示をいただいた九州大学名誉教授藤川武信博士、九州大学教授高山昌照博士ならびに九州・沖縄地区大学農学部土質理工学研究グループ各位に心からの謝意を表します。

引用文献

- 1) Laws, J. O. : Measurements of the fall-velocity of water-drops and raindrops. Amer. Geophys. Union Trans. 22, pp. 709~721 (1941).
- 2) 三原義秋・矢吹萬壽：雨の運動エネルギーに就て、農業気象5(3), pp. 126~128 (1950).
- 3) 田中 茂：急斜面の土壌浸蝕量に関する一実験公式、土木学会誌37(12), pp. 1~4 (1952).
- 4) Neal, J. H. : Effect of degree of slope and rainfall characteristics on runoff and soil erosion, Agr. Eng. 19, pp. 213~217 (1938).

(昭和56年12月8日受理)

Summary

Soil erosion is affected by a large number of variable factors which cannot be readily analyzed under field conditions. The major objective of the study reported in this paper was to analyze the relationships between soil erosion and various factors such as slope inclination, rainfall characteristics, and soil properties.

Masatsuchi, Shirasu, Kuroboku and Mahji soils were compared for their content in Kaolinite. This study, using simulated rainfall, produced erosion data from a soil pan 30cm long on slopes of 2, 4, 8, 14, 25, and 35 degrees. Losses from the soil pan in Shirasu and Masatsuchi soils rapidly increased with the increase in the inclination of the slope. Soil losses in Shirasu soil were more pronounced soil than in the other four soils. Soil losses of Masatsuchi soil increased rapidly when the inclination of the slope was above 25 degrees and were identical with those of Shirasu soil above a slope inclination of 35 degrees. Since, the erosion of Masatsuchi soil caused the loss of soils with a feature finer than their of Kuroboku and Mahji soils up to a slope inclination of about 20 degrees, the total soil loss was lower.