HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 傾斜枠試験による土壌流亡挙動の研究 （Ⅰ） ： １９８８年秋期における裸地区の水食 |
| Author(s) | 長沢, 徹明; 梅田, 安治; 井上, 京 他 |
| Citation | 北海道大学農学部邦文紀要, 17(1), 11-17 |
| Issue Date | 1990-03-31 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/12116 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 17(1)_p11-17.pdf |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北大農邦文紀要 17(1): 11～17, 1990

# 傾斜枠試験による土壌流亡挙動の研究 (I)

## ——1988年秋期における裸地区の水食——

長沢徹明・梅田安治・井上 京・李 里漫
(北海道大学農学部農業工学科土地改良学教室)

(平成元年8月17日受理)

# Behaviors of Soil Loss in Slope-lysimeter (I)

## ——Rainfall and Erosion on Bare Slope, Autumn, 1988——

Tetuaki NAGASAWA, Yasuharu UMEDA, Takashi INOUE and Liman LI
(Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture,
Hokkaido University, Sapporo, Japan)

## 1. まえがき

北海道では，近年，農業生産の拡大安定と効率的な機械化作業を目途として，大規模な農地造成事業が展開されてきた。このとき，平野部にはすでに開発の余地は少なく，丘陵地帯などの傾斜地を対象とする場合が多いことから，造成事業は土壌侵食（水食）の危険性を伴うものであった。したがって，造成農地の生産力の維持および自然環境の保全問題などに対し，合理的な造成計画，安全かつ経済的な防災対策などが必要とされている[1]。これらの対策を適正に実施するためには，地域自然条件による土壌流亡挙動を十分に把握し，侵食量を正確に予測することが必要である。

土壌侵食を定量的に予測する手法の一つに，いわゆる侵食流亡土量予測式（USLE, Universal Soil-Loss Equation, (1)式）がある。これは，Wischmeierらが中心となって1940年代から開発と改良がつづけられ，現在広く採用されているものである[2]。

$$A=R\cdot K\cdot L\cdot S\cdot C\cdot P \quad \cdots\cdots(1)$$

A: 侵食流亡土量
R: 降雨流出係数
K: 土壌係数
L: 斜面長係数
S: 傾斜係数
C: 作物管理係数
P: 保全係数

一方，この式の適用性についていろいろな問題点が指摘されている。すなわち適用地域の気候や土壌，営農条件に合致した係数を求める必要があり，とくに地域的変動の大きい土壌係数Kについては吟味する必要がある。しかし，USLEについては多くのデータの蓄積があることから，農地保全にとって極めて有用な情報を提供するものである。したがって(1)式の諸係数を再検討することによって，北海道の傾斜畑の保全に効力を発揮させることができよう。実際，道内でもUSLEに準拠した試験地が設置され，解析がすすめられている[3]。

本報告は，それらの現象の基礎的課題を検討するため，北海道大学附属農場に設置された傾斜試験枠で観測した土壌流亡挙動を通じ，その挙動特性と予測に関して検討を加えたものである。

## 2. 枠試験

### 2-1). 傾斜試験枠

試験枠は北海道大学附属農場南部に位置し，勾配9%，幅1.0 m，長さ5.0 mの枠が4面西向きに設置されている（Fig. 1, Photo.）。枠の集水境界として幅30 cmの塩化ビニル板を地中に20 cmほど差し込んでいる。枠の下流端にはステンレス製の集水装置があり，流出水量および流亡土量を測定することができる。4枠を2組に分け，それぞれ裸地と草地2種の条件に設定した。1組は冬期間除雪して地盤を凍結させるようにし，他の1組は積雪で地盤が凍結しない状況を設定した。これらの試験枠によっ

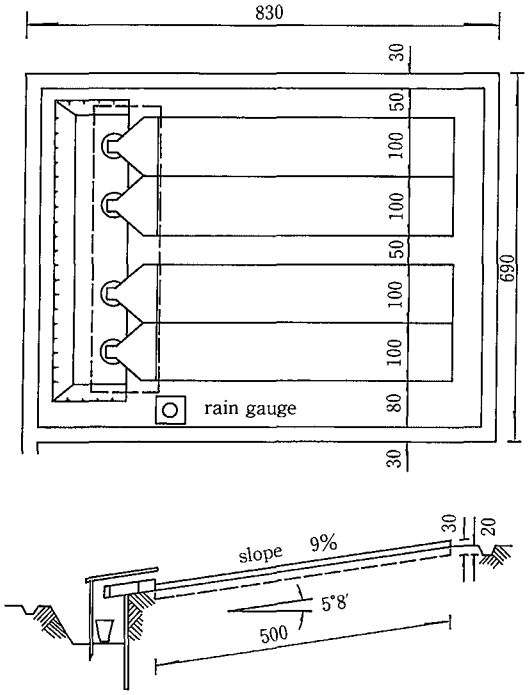


**Fig. 1.** Structure of slope-lysimeter (unit: cm)

て，植生の有無や地盤凍結融解作用が水土流出に及ぼす影響を検討する予定である。

本報告は，これらの検討事項の基礎的な対応ともいえる裸地での観測および解析結果である。

### 2-2). 表土の性質

表層の土壌は，土粒子の真比重2.69，LL=62%，PL=46%である。また粒度分布はFig. 2で示され，日本統一土質分類ではシルト（高液性限界），MHに分類される。

### 2-3). 観測方法

試験枠近傍に精度0.5 mmの転倒枡式雨量計を設

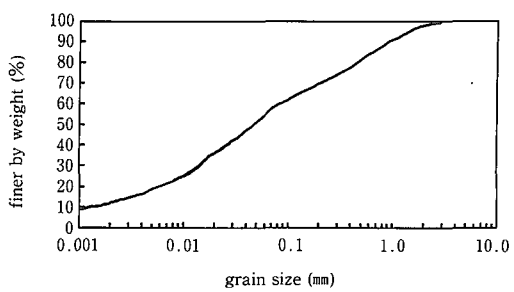


**Fig. 2.** Grain size composition of soil in slope-lysimeter

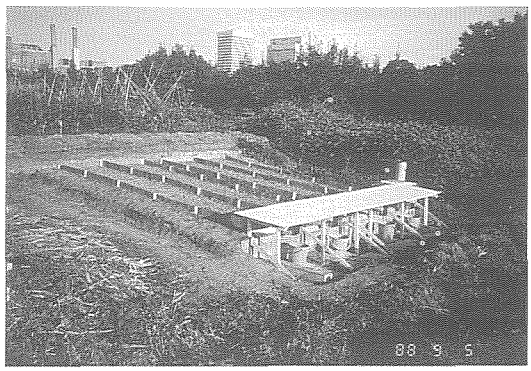


**Photo.** Feature of slope-lysimeter

置し，10分ごとの降雨量を記録する。また，各枠の集水装置末端に設置したバケットにより，1雨ごとの流出水量と流亡土量を計測する。このような観測を1988年9月8日から11月28日までの約3カ月における40回の降雨に対して行った。そのうち実際に水土流出が発生したのは16回であった。なお11月25日の雨については，降雨開始から終了に至るまでの流出水量と流亡土量を毎時間計測した。

## 3. 降雨の性質と土壌流亡

### 3-1). 降雨量と流亡土量

降雨量は降雨の性質をあらわす基本的指標の一つ

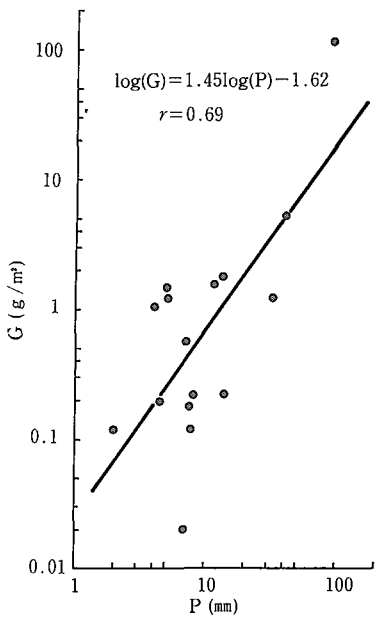


**Fig. 3.** Relation between soil loss (G) and rainfall amount (P)

で，流亡土量と密接な関係があると考えられる。今回の観測結果から，流亡土量と降雨量との間にはFig. 3 に示すような相関性がみられる。ほぼ同じ降雨量でも流亡土量が相当違う場合もあるが，このおもな原因は降雨強度など降雨条件の違いによるものと考えられる（Table 1）。

### 3-2). 降雨強度と流亡土量

降雨強度は降雨の侵食性に反映する重要な指標の一つと考えられる。降雨強度により，雨滴径，最終速度および運動エネルギーなどが決まるとされている[4]。しかし，分析の結果，一雨の平均降雨強度と流亡土量との相関性はあまり高くなく，相関係数は0.59である。つぎに，10分，20分，30分，60分ピーク降雨強度 $I_{10}$，$I_{20}$，$I_{30}$，$I_{60}$ を取り上げて流亡土量Gとの相関性を分析した結果，Table 2 に示すように相関係数が0.79～0.73となり，より短い時間のピーク降雨強度との相関性が高い傾向にあった。

### 3-3). EI値と流亡土量

USLEの降雨流出係数Rは，侵食性降雨ごとの降雨エネルギーEとその降雨の30分ピーク降雨強度 $I_{30}$ との積 $EI_{30}$ の年間合計値と定義されている。侵食性降雨とは，総降雨量0.5 inch(12.7 mm)以上で，それ以前の無降雨時間が6時間以上のものであり，また15分間で0.25 inch（6.4 mm）を越える場合にも侵食性降雨とみなされる[5]。この係数Rについてはいくつか議論がある。たとえば $EI_{30}$ やRの物理的な根拠が明かでないこと[6]，USLEはアメリカでの試験結果に基づいて成立したもので，ほかの地域での適用には十分な検証が必要であること[7]，などが指摘されている。本調査では，上の定義による降雨量以下のものについても検討の対象とした。

まず，降雨の侵食性の指標であるEI値について，降雨強度の影響を検討する。すなわち，一連降雨の10分，20分，30分，60分ピーク降雨強度 $I_{10}$，$I_{20}$，$I_{30}$，$I_{60}$ によるEI値と流亡土量Gの関係を分析した。Table 3 に示すように，いずれもピーク降雨強度単独の場合より高い相関性が認められ，また，より短い時間のピーク降雨強度によるEI値ほど相関性が高い傾向にある。Wischmeierらは降雨量，降雨運動エネルギー，5分，15分，30分ピーク降雨強度，先行降雨量などの因子を組み合わせて，流亡土量との相関性を分析した。その結果，降雨運動エネルギーEと30分ピーク降雨強度 $I_{30}$ との積 $EI_{30}$ が，流亡土量との相関性が最も高いことを確かめた[8]。しかし本研究の結果によれば，$EI_{30}$ より $EI_{20}$，$EI_{10}$ など，より短い時間降雨強度によるEI値ほど流亡土量との相関性が高い傾向にあった。これらの結果から，どのようなピーク降雨強度のEI値が流亡土量と最も相関性が高いかは，その降雨の性質に影響されるものと推定される。

**Table 1.** Rainfall characteristics and soil loss.

| date | rainfall amount (mm) | peak rainfall intensity (mm/hr) | soil loss ($g/m^2$) |
|---|---|---|---|
| 9/8 | 12.0 | 12.0 | 1.58 |
| 9/9 | 13.0 | 21.0 | 1.72 |
| 10/27 | 13.5 | 6.0 | 0.22 |
| 11/27 | 12.5 | 6.0 | 0.00 |

**Table 2.** Relation between soil loss (G) and peak rainfall intensity (I).

| | | |
|---|---|---|
| $G\sim I_{10}$ | $\log(G)=2.35\log(I_{10})-2.26$ | $r=0.79$ |
| $G\sim I_{20}$ | $\log(G)=2.15\log(I_{20})-1.86$ | $r=0.76$ |
| $G\sim I_{30}$ | $\log(G)=2.07\log(I_{30})-1.67$ | $r=0.73$ |
| $G\sim I_{60}$ | $\log(G)=2.07\log(I_{60})-1.40$ | $r=0.73$ |

**Table 3.** Relation between soil loss and EI value.

| | | |
|---|---|---|
| $G\sim EI_{10}$ | $\log(G)=1.03\log(EI_{10})-0.23$ | $r=0.83$ |
| $G\sim EI_{20}$ | $\log(G)=0.95\log(EI_{20})-0.13$ | $r=0.80$ |
| $G\sim EI_{30}$ | $\log(G)=0.94\log(EI_{30})-0.07$ | $r=0.79$ |
| $G\sim EI_{60}$ | $\log(G)=0.89\log(EI_{60})-0.04$ | $r=0.77$ |

### 3-4). 札幌地域の降雨流出係数および侵食性降雨

降雨流出係数Rは降雨の侵食性を表わす指標で，地域の基本的な侵食因子と考えられ，降雨データの分析から直接得られる。USLEの定義によれば，Rは $EI_{30}$ 値の年間合計を長期間集積して求める年平均値である。最近，Rを寒期，暖期また四季別に求める提言もある[6]が，これはある地域での季節による降雨侵食状況を把握するためには極めて重要な概念と考える。さて，約3カ月の降雨観測データによれば，札幌地域における1988年秋期の降雨流出係数は $R_a=46.35$（$m^2\cdot tf/ha\cdot hr$）（メートル法から米国慣習法に換算すれば $R_{USC}=26.71$（$100\ ft\cdot tf_1\cdot in/ac\cdot hr$））となり，たとえば宮崎市の秋期降雨係数

$R_K$＝233 ($m^2$・$tf_i$/ha・hr)[6]（細山田らによる簡便法の数値。米国慣習法に換算すれば$R_{USC}$＝245）よりかなり小さな値であることがわかった（$tf_i$は米トンであり，1$tf_i$≒907 kg 重）。

前述のように侵食性降雨は総降雨量0.5 inch（12.7 mm）以上のものと定義されているが，侵食が発生する降雨量の下限は土質の状況などによって変化することが考えられる。ここでの観測結果によれば，降雨量が2.0 mm 以下では土壌流亡が発生していない。また，流亡が発生する降雨量は5.0 mm 以上であり，2.0～5.0 mm では流亡が発生する場合としない場合があった。いずれにしても，USLE で定義される侵食性降雨量12.7 mm よりはかなり小さいものであった。

## 4. 表面流出と土壌流亡

前節では，降雨条件と水食の関係について検討を加え，とくにEI値と流亡土量の間に高い相関性のあることを確認した。ここで取り扱った降雨因子は主として雨滴エネルギーに基づくものであり，降雨の結果として発生する表面流出に直接関与するものではない。しかし，斜面を流下する表面流出は掃流力による機械的水食作用や雨滴の衝撃で破壊分散した土粒子の運搬作用を伴い，水食に大きな影響を及ぼすはずである。本節では，試験枠で観測された降雨～流出に関する挙動から，流出と水食の関係について検討する。

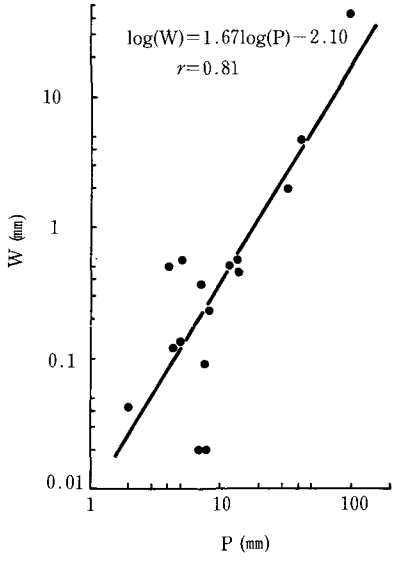


**Fig. 4.** Relation between surface runoff (W) and rainfall amount

**Table 4.** Relation between surface runoff (W) and peak rainfall intensity.

| | | |
|---|---|---|
| W～$I_{10}$ | log(W)＝2.24 log($I_{10}$)－2.43 | r＝0.77 |
| W～$I_{20}$ | log(W)＝2.04 log($I_{20}$)－2.05 | r＝0.73 |
| W～$I_{30}$ | log(W)＝2.02 log($I_{30}$)－1.90 | r＝0.73 |
| W～$I_{60}$ | log(W)＝2.05 log($I_{60}$)－1.65 | r＝0.74 |

**Table 5.** Relation between surface runoff and EI value.

| | | |
|---|---|---|
| W～$EI_{10}$ | log(W)＝1.08 log($EI_{10}$)－0.50 | r＝0.88 |
| W～$EI_{20}$ | log(W)＝1.00 log($EI_{20}$)－0.39 | r＝0.85 |
| W～$EI_{30}$ | log(W)＝0.99 log($EI_{30}$)－0.33 | r＝0.85 |
| W～$EI_{60}$ | log(W)＝0.94 log($EI_{60}$)－0.21 | r＝0.83 |

### 4-1). 表面流出水量と降雨特性

流出量Wと降雨量Pとの関係は，Fig. 4 に示すような高い相関性が認められる。降雨の10分，20分，30分，60分ピーク降雨強度$I_{10}$，$I_{20}$，$I_{30}$，$I_{60}$と流出水量との相関関係はTable 4 のようになり，短時間のピーク降雨強度との相関性が高い傾向がみられる。同じように一連降雨の$EI_{10}$，$EI_{20}$，$EI_{30}$，$EI_{60}$値と流出水量の相関関係をTable 5 に示す。いずれもピーク降雨強度より高い相関性がみられ，より短時間のピーク降雨強度によるEI値との相関性がやや高い傾向にある。ちなみに$EI_{30}$と表面流

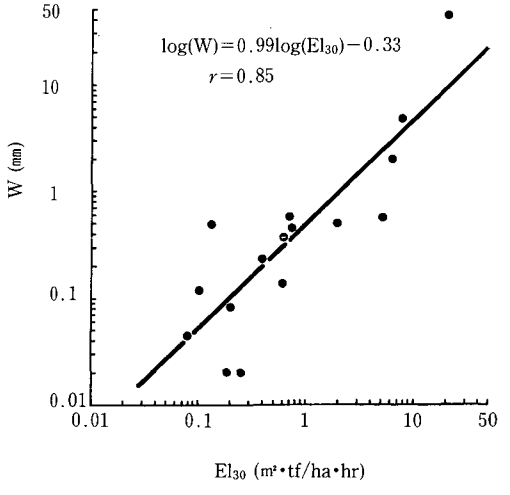


**Fig. 5.** Relation between surface runoff and $EI_{30}$ value

出水量との関係をプロットするとFig. 5に示すようになる。

**4-2). 表面流出と流亡土量**

降雨エネルギーEは雨滴の終速度と質量で計算される運動エネルギーである[8]。これと30分ピーク降雨強度$I_{30}$との積$EI_{30}$値は雨滴の衝撃作用から考えられたもので，表面流出水による運搬作用，洗掘作用などを直接評価するものではない。しかし，前述のように$EI_{30}$値と流出水量との相関性が高いことから，EI値は雨滴侵食だけにかかわるものではなく，表面流による掃流力および土砂運送力などにも，ある程度反映する総合的指標と考えられる。これは，流出水量と流亡土量の関係がFig. 6に示されるような高い相関関係にあることからも認められよう。

斜面上の土を下方へ流亡させるのは，Fig. 7で表わすように斜面で分離させ侵食土砂として生産する作用と，それを運搬する作用の両者が関与する。そして，両作用は互いに制限因子となり，結果としての流亡土量を決定付ける。この場合，降雨エネルギー，さらにはEI値が，両作用に対して強い影響力を有すると推察される。

**5. 一連降雨下での水土流出挙動**

降雨開始から終了までの水土流出の時間的変化は，雨の降り方や土壌水分などに左右されると考えられる。いま1988年11月24日における90.5 mmの雨を例にして，降雨量，流出水量，流亡土量の経時変化をFig. 8に示す。降雨量の変化に伴って表面流出水量および流亡土量も変化し，とくに降雨量ピーク時に水土流出量も最大値を示している。

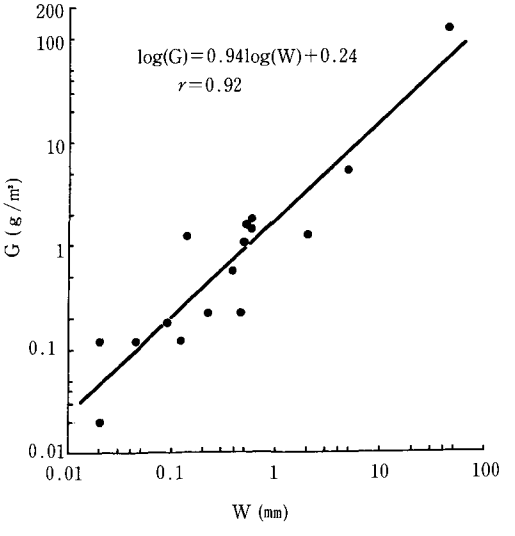


**Fig. 6.** Relation between soil loss and surface runoff

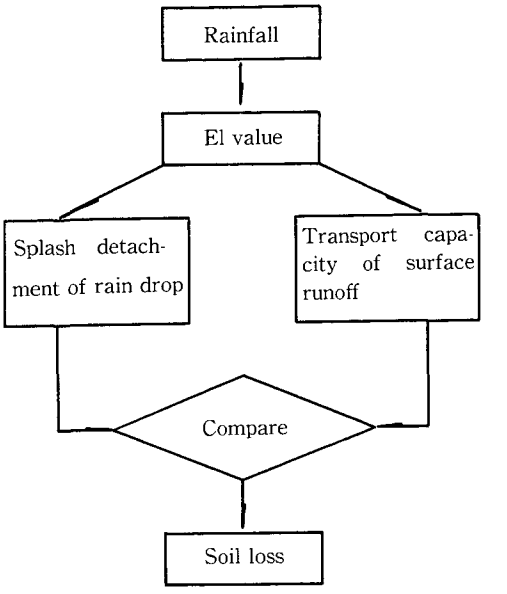


**Fig. 7.** Soil loss under the rainfall

流亡土量および流出水量と降雨因子間の関係を検討するため，時間降雨量P'，各時間内の10分ピーク降雨強度$I_{10}$'および時間ごとの$EI_{10}$'値を取り上げ，時間流亡土量G'との相関関係を求めたところ，Table 6に示すようにいずれも高い相関性が認められた。また，流出水量W'についても同じように相関性を認めた（Table 7)。

Fig. 9は時間降雨量P'と時間当りの表面流出率f'，および単位降雨量当りの流出率f'/P'の経時的変化を示したものである。時間雨量の増加とともに

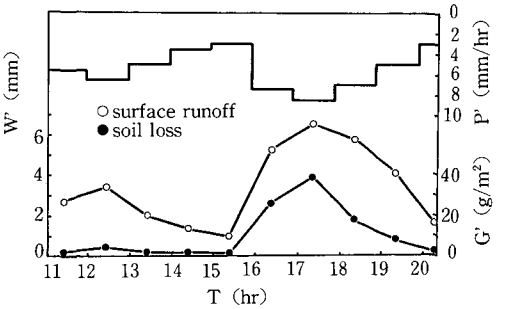


**Fig. 8.** Process of soil loss (G'), surface runoff (W') and rainfall (P') (1988. 11. 24)

**Table 6.** Relation between soil loss and characteristics of the rainfall.

| | | |
|---|---|---|
| G'～P' | $\log(G')=3.26\log(P')-1.78$ | r=0.85 |
| G'～$I_{10}$' | $\log(G')=3.19\log(I_{10}')-2.35$ | r=0.82 |
| G'～$EI_{10}$' | $\log(G')=2.94\log(EI_{10}')-3.41$ | r=0.84 |

**Table 7.** Relation between surface runoff and characteristics of the rainfall.

| | | |
|---|---|---|
| W'～P' | $\log(W')=1.31\log(P')-0.52$ | r=0.82 |
| W'～$I_{10}$' | $\log(W')=1.25\log(I_{10}')-0.72$ | r=0.77 |
| W'～$EI_{10}$' | $\log(W')=1.16\log(EI_{10}')-1.14$ | r=0.79 |

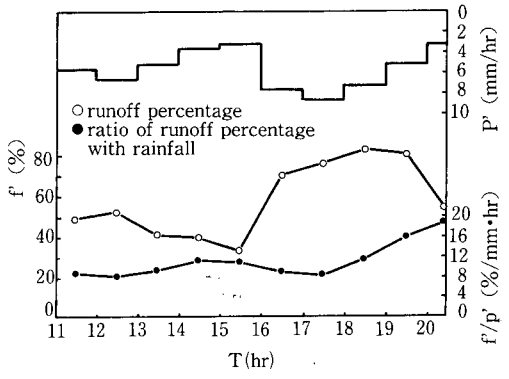


**Fig. 9.** Runoff percentage (f') through the rainfall period

流出率も増加し，単位降雨量当りの流出率 f'/P' は降雨の前期から後期にわたって増大する傾向がみられる。これは降雨の継続に伴い土壌水分状態や浸入性などが変化することによる影響と考えられる。

また Fig. 10 は時間降雨量 P' とその時間の流出土壌濃度 D の関係曲線である。これによれば P' と D の間には密接な関係があること，および降雨後半の D が前半に比べて大きいことが明らかである。これは，降雨の継続にしたがって表面土壌の耐食性が低下し表土が流亡し易くなることを示している。

## 6. 土壌係数 K の試算

土壌係数 K は表土の耐食性をあらわす指標であり，基準枠で観測される年間侵食流亡土量 A と降雨流出係数 R により求められる。表土の耐食性は，水分条件や凍結，乾燥履歴あるいは降雨条件などに影響され，時間的に変動するが，USLE で定義される土壌係数は地域に固有の値である。しかし，季節ごとの土壌耐食性，とくに北海道の場合春先の耐食性を検討することは有意義であろう。

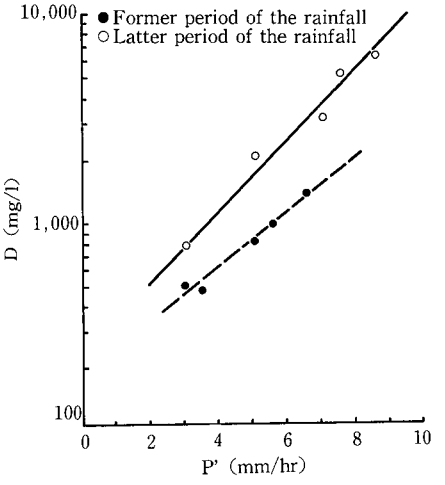


**Fig. 10.** Relation between sediment concentration (D) and rainfall

ここでは春期，あるいは他の時期の耐食性との比較を目的として，秋期3カ月の観測による仮の K 値を求めることにする。

USLE によって K 値を求めるには，長さ 22.1 m，傾斜 9%，清耕状態の裸地斜面を基準とすることから，(1)式の L，S，C，P 各因子はそれぞれ1となる。本試験枠の場合には斜面長 5.0 m であることから，(2)式により係数 L を換算する必要がある[9]。

$$L_a=(\lambda/72.6)^{0.5} \quad \cdots\cdots(2)$$

ここで，

$\lambda$：試験枠の斜面長（ft）

$L_a$：換算した斜面長係数

試験枠の斜面長 5.0 m を ft に換算して（$\lambda$=16.4 ft）(2)式に代入し，$L_a$=0.475 を得る。また秋期流亡土量 $A_a$=1.316（t/ha），降雨流出係数 $R_a$=46.35（$m^2$·tf/ha·hr），係数 S，C，P を1として求めた土壌係数は $K_a$=0.060（t·hr/$m^2$·tf）（メートル法から米国慣習法に換算すれば $K_{USC}$=0.046（$t_1$·hr/100 ft·in·$tf_1$，$t_1$ は米トンの質量単位））となる。この値はアメリカで得られている土壌係数[10]と比べて小さく，宮崎での土壌係数 $K_K$=0.016～0.033（t·hr/$m^2$·$tf_1$）[11]（米国慣習法に換算すれば $K_{USC}$=0.007～0.014）よりかなり大きい。

また，USLE で定義される侵食性降雨（一連降雨量 12.7 mm 以上）は，観測期間中5回発生した。この5回の降雨による降雨流出係数 $R_b$=39.41 から

土壌係数を求めると $K_b=0.070$ （t•hr/m²•tf）となり，$K_a$より若干大きな値となる。

## 7. まとめ

北海道大学附属農場で実施中の傾斜枠試験結果から，1988年秋期の裸地区における降雨～流出～土壌流亡に関して以下の知見を得た。

(1) 降雨の10分，20分，30分，60分ピーク降雨強度とその降雨の運動エネルギーEとの積 $EI_{10}$，$EI_{20}$，$EI_{30}$，$EI_{60}$ 値はいずれも流亡土量と高い相関性を示し，より短時間のピーク降雨強度によるEI値ほど相関性は高い傾向にあった。

(2) 表面流出水量はその降雨のピーク降雨強度よりEI値との相関性が高く，またより短時間のピーク降雨強度によるEI値ほど相関性はやや高い傾向を示した。

(3) 降雨開始から終了までの経時観測の例によれば，水土流出挙動は降雨の時間的変化に対応して推移し，毎時刻に測定した流出水量と流亡土量の間には高い相関関係がみられた。また，降雨の継続にともなって，侵食性は増大する傾向が認められた。

## 8. あとがき

水食は水文条件と密接な関係があり，年によって，また季節によって変化する確率的な自然現象と考えられる。本報告は短期間の観測結果に基づくものであり，定量的に安定した資料となるよう今後継続観測して検討することが必要である。すなわち，年間を通じての観測から得られる本来の降雨流出係数Rとそれによる土壌係数Kを求め，また北海道特有とも言える春季融雪流出時の侵食，地盤の凍結融解に起因する侵食などについて研究を進める予定である。

本研究を進めるに当り，用地の提供と便宜をはかっていただいた農学部附属農場関係各位に厚くお礼申し上げる。また，試験枠の造成から観測に対して御協力いただいた当教室学生諸氏に深く感謝する。

## 引用文献

1. 梅田安治・長沢徹明・水谷 環： 改良山成畑工による農地の造成と保全（I）—斜里山麓・南後志地域における調査事例—，北大農邦文紀要**15**(4)，pp. 337-344 (1987).
2. Science and Education Administration USDA : Predicting Rainfall Erosion Losses, A Guide to Conservation Planning, pp. 3-7 (1978).
3. 長沢徹明・梅田安治： 北海道における農地造成と保全，北海道土地改良設計技術協会，pp. 91-106 (1988).
4. 三原義秋： 雨滴と土壌侵食，農技研報告 A(1)，pp. 1-51 (1951).
5. 前 出 2) p. 5.
6. 細山田健三・藤原輝男： 侵食流亡土量の予測に関するUSLEの適用について（I）—USLE適用の背景及び降雨係数—，農土誌**52**(4)，pp. 43-49 (1984).
7. MORGAN, R. P. C.: Soil Erosion and Conservation, Longman Scientific & Technical, pp. 116-121 (1986).
8. WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D.: Rainfall Energy and Its Relationship to Soil Loss, Trans. Am. Geophy **39**(2), pp. 285-291 (1958).
9. 前 出 2) p. 14.
10. 前 出 2) p. 9.
11. 細山田健三・藤原輝男： 侵食流亡土量の予測に関するUSLEの適用について（II）—USLEにおける土壌係数，傾斜斜面長係数，作物管理係数および保全係数—，農土誌**52**(6)，pp. 29-34 (1984).

## Summary

The experiment on behaviors of soil loss and surface runoff from bare slope was carried out with slope-lysimeter at Experimental Farm of Hokkaido University in Autumun, 1988. Soil loss and surface runoff were observed with every rainfall or every hour through a rainfall. The relationship between characteristcs of rainfall, soil loss and surface runoff was analysed and discussed based upon the USLE and the conclusions were drawed as follows: 1) Rainfall factors, EI values with peak rainfall intensities of various periods have a correlation with soil loss and there is a tendency the shorter the period of rainfall intensity the better correlation between them. 2) Surface runoff has a correlation with EI value better than peak rainfall intensity and there is a tendency the shorter the period of rainfall intensity the better correlation with them, and also there is a high correlation with surface runoff and soil loss. 3) Behaviors of runoff and soil loss were changing with time process of the rainfall and the soil erodibility was increased with the time throughout the rainfall.