

斜面における定常侵食のシミュレーション

筑紫二郎*・河野 洋*・藤原輝男**・吉田 勲*

昭和59年7月31日受付

Simulation of the Steady State Erosion under Various Slope Conditions

Jiro CHIKUSHI*, Hiroshi KOUNO*, Teruo FUJIWARA**
and Isao YOSHIDA*

Simulations of the erosion and deposition process under steady state rainfall were performed by using Meyer and Wischmeier's (1969) model to investigate the influences of the various slope conditions on erosion. We obtained very effective results, such as that the concave slope yields less sediments rather than the convex slope, that the control at the end of slope decreases eroded load in the upstream, that the slot mulch has the effect of decreasing runoff rate and spreading the depositions, and so on. Combined with the results obtained by Meyer and Wischmeier, these results would give us the comprehensive knowledge when we estimate the erosion rate in the slope.

ま え が き

土壌侵食は、複雑な現象であり、モデル化が非常に難しいものの一つである。これまでに使用されているモデルには、経験式に基づくものが多く、降水、浸透、流出、土壌構造等の相互関係を表わした数学的な侵食モデルはほとんど見当たらない。その中で、Meyer and Wischmeier³⁾によって発表された概念的モデルは、決定論的な数学モデルの開発を行う上で出発点を与えているように思われる。そこでは、斜面形状、斜面長、降雨強度、土壌の剥離性の程度の違いによる土壌侵食過程についてシミュレーションが行われ、土砂の侵食・堆積状

況及び降雨や流水の剥離能・輸送能による侵食への影響が調べられている。

本研究においては、この Meyer and Wischmeier のモデルを用い、彼らがまだ扱っていない実際の侵食の場合についてシミュレーションを行い、ここでの結果と彼らの結果とを総合することによって、より広範な知識を得ることを目的とする。

シミュレーションの方法

計算には、Meyer and Wischmeier¹⁾によって提出されたモデルを用いるが、そのモデルを要約すると以下のとおりである。

* 鳥取大学農学部農業工学科農地造成学研究室
Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University
** 山口大学工学部土木工学科水工学研究室
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi University

モデルにおける主な仮定は、次の三つである。

- (1)降雨強度や浸潤強度に対する風の効果は無視する。
- (2)降雨は定常である。
- (3)リルパターンについては考慮しない。

また、モデルには、次の四つの副次過程が考えられている。

(1)降雨による剥離能 D_R

降雨による剥離量は、降雨強度 I の2乗と、対象となる面積 A_1 に比例するものとして次式で与えられている。

$$D_R = S_{DR} A_1 I^2 \quad (1)$$

ここで、 S_{DR} は定数である。

(2)表面流出水による剥離能 D_F

D_F の推定式として次式が用いられている。

$$D_F = S_{DF} A_1 \cdot \frac{1}{2} (S_s^{2/3} Q_s^{2/3} + S_e^{2/3} Q_e^{2/3}) \quad (2)$$

ここで、 S_{DF} は定数、 S, Q はそれぞれ斜面勾配と流量であれ。添字 s と e は、それぞれ微小区間の始点と終点を意味する。したがって、 D_F は区間の両端の剥離能の平均値に区間面積 A_1 を乗じたものである。

(3)降雨の輸送能 T_R

T_R は、雨滴の飛散によって輸送された土量である。この場合の関係式は次式で表される。

$$T_R = S_{TR} S I \quad (3)$$

ここで、 S_{TR} は定数である。

(4)地表流の輸送能 T_F

T_F の推定式は、次式で表される。

$$T_F = S_{TF} S^{5/3} Q^{5/3} \quad (4)$$

ここで、 S_{TF} は定数である。

つぎに、計算の手順は次のとおりである。

- 1)斜面を微小区間に分ける。
- 2)定数 S_{DR} , S_{DF} , S_{TR} , S_{TF} の値を仮定する。
- 3)最初の微小区間について、 D_R , D_F , T_R , T_F を計算する。
- 4) $D_R + D_F$ を $DINC$, $T_R + T_F$ を $TCAP$ とし、 $DINC$ と $TCAP$ とを比較する。それらのうち、小さい方の値が微小区間から運び出される土砂量となる。
- 5)この輸送土砂量から、前の区間からの輸送土砂量(最初の区間ではゼロ)を差し引いた量が当該区間における正味の土砂損失量となる。この量が正ならば侵食を表し、負ならば堆積を表す。
- 6)次の区間について、 D_R , D_F , T_R , T_F を計算し、4)に戻り、同様な計算を繰り返す。

ここで用いるモデルは、物理的原理に基づいているといっても、まだ概念的な部分が多い。例えば、定常的な

侵食が仮定されているが、実際には定常は有り得ない。たとえ降雨強度が一定であるにしても、浸透能は経時的に変化するし、土壌の剥離や斜面の勾配も侵食が進むにつれて変化するはずである。また、ここで扱う四つの侵食過程は、それぞれが複雑相互に関連し合っていると考えられるのに反し、降雨と地表流の効果を単なる和の形で扱っているところはとくに概念的といえよう。ここで、「剥離」という言葉の意味については、著者らは、互いに結合している土壌粒子がその結合力(例えば、粘着力、電気的力等)から解放されて自由になり、あとは限界掃流力以上の掃流力をもつ流れによっていつでも流される状態になることとして解釈している。

このように、このモデルは概念的であるため、定量的な予測を行なうことは不可能であるが、侵食に作用する種々の因子の影響について定性的に把握するには適当なモデルであると思われる。それは、モデルに含まれている四つの過程が経験に基づく水理学、気象学、水文学的關係によって表されているからである。

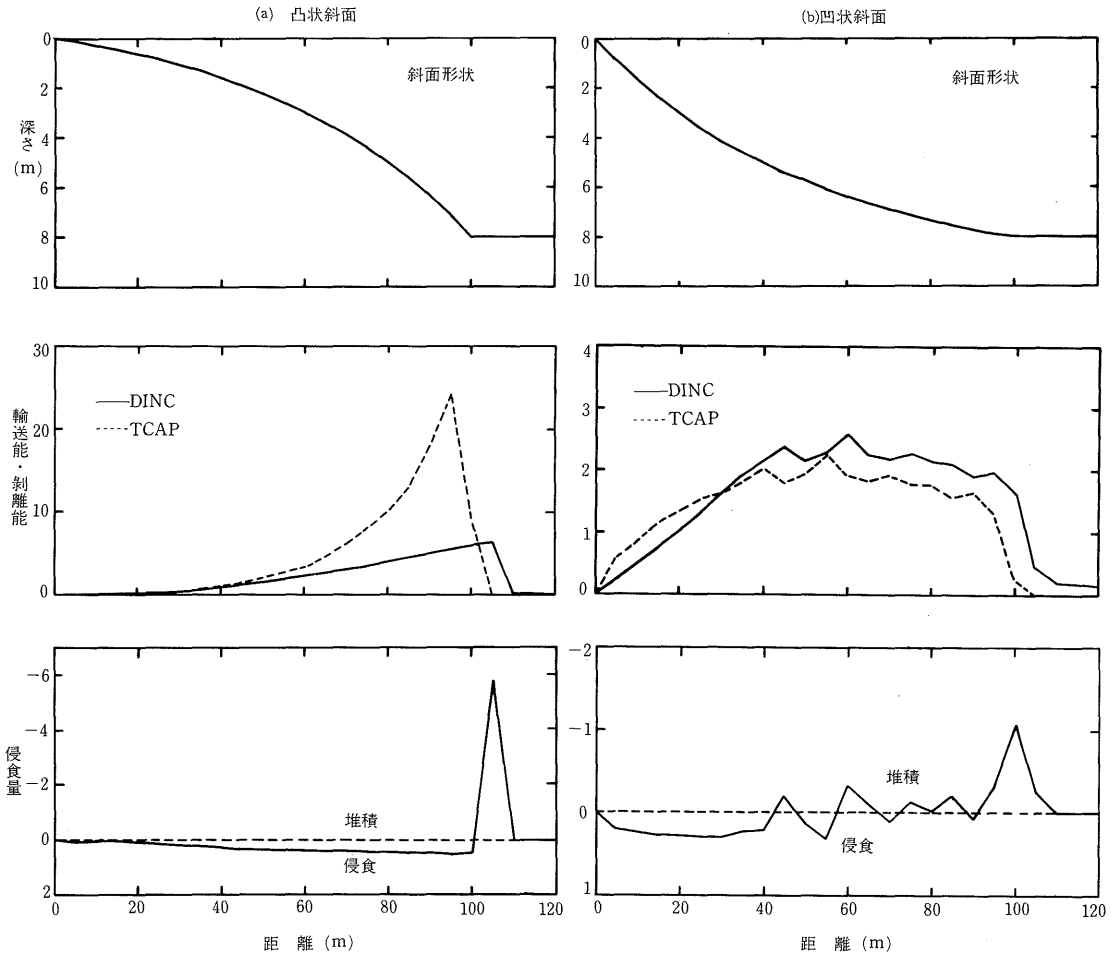
モデルの使用に当っては、(1)~(4)式に含まれる四つの定数に値を与える必要がある。これらの定数の次元は、土壌侵食能の次元をどのように表すかによって変化し、またその値もそれぞれの定数をどの単位で表すかによって変化する。ここでは、Meyer and Wischmeier⁹⁾に準拠した値を用いた。すなわち、 $S_{DR}=15$, $S_{DF}=0.006$, $S_{TR}=0.5$, $S_{TF}=0.05$ である。また、微小区間長は5 m、降雨強度は0.05m/h、浸潤強度は0.025m/hとした。土壌侵食(堆積)の単位は、上記の定数の単位によって決定されるが、ここでは原著同様にそのままユニットで表すことにする。

結 果

1. 凸状斜面と凹状斜面との比較

平均斜面勾配が同じ(ここでは、8%)で、斜面形状が凸状の場合と凹状の場合についてシミュレーションを行った。その結果を第1図に示す。凸状斜面の上流部では、勾配が小さいために $TCAP$ と $DINC$ とはそれほど差がないが、斜面下流に行くにつれて $DINC$ に比し $TCAP$ の方が急激に増大している。 $TCAP$ の増大は、(4)式において T_F が S の5/3乗に比例することから生じている。この場合、侵食量はどの位置においても剥離能によって支配されている。また、下流に向かって侵食量が次第に増大し、下流端の平坦なところで大きな堆積が生じている。

一方凹状斜面の場合、上流部では $TCAP$ の方が



第1図 凸状斜面と凹状斜面との比較

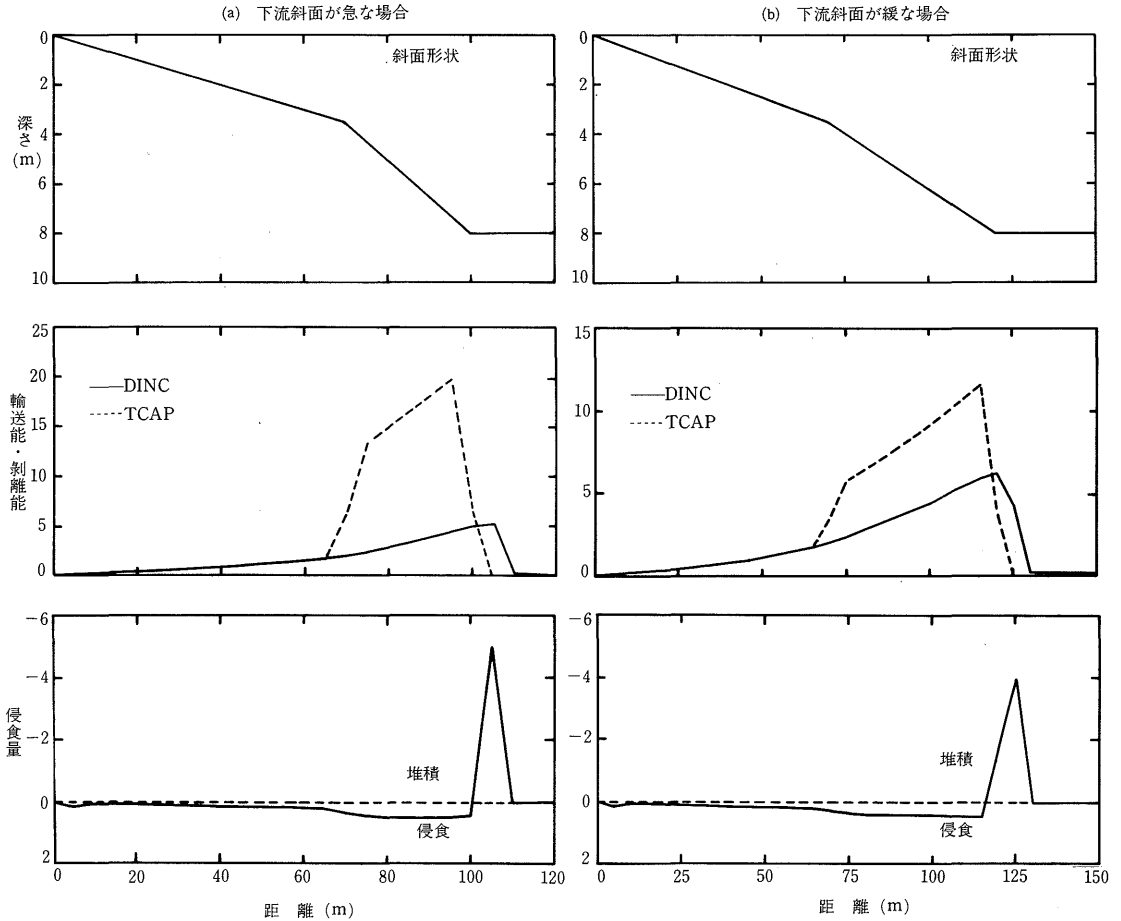
DINC よりも大きいですが、ある地点（ここでは30m 付近）を越えると逆転している。また、斜面に沿って全体的に見ると、*TCAP*、*DINC* いずれにおいても凸状斜面に比し、値が小さく、小さな変動が見られる。そのため、斜面に沿って、侵食と堆積が繰り返されている。下流端においては、多少大きい堆積が生じているが、その量は凸状斜面の場合の1/5程度であった。

以上のように、凹状斜面の場合、凸状斜面に比べて流出土砂量が少ないという結果は、Youngs and Mulchler⁹⁾による実験結果と一致する。また、凹状斜面において侵食された流出土砂は、上流にあったものよりも下流にあったものの方が多いという彼らの結果は、斜面の途中でとところ堆積が生じているこのシミュレ-

ーション結果からも理解できる（第1図(b)）。

2. 上流側の勾配が同じで下流側の勾配が異なる場合
上流側70m までは同一勾配（5%）であるが、下流側勾配が異なる（15%と9%）2つの斜面について比較を行った（第2図）。この場合、下流側勾配が異なるため、全体的な平均勾配も異なる。いずれの場合も、上下流斜面の境界から *TCAP* が急激に大きくなっているが、(a)の場合の方が急傾斜であるため、(b)の場合よりも値が大きくなっている。したがって下流斜面の単位長さ当りの侵食量は(a)の場合の方が多少大きい。斜面下端における土砂堆積量は、(b)の場合の斜面長が長いことを考慮しても、(a)の場合の方が大き目になっている。

3. 斜面下端条件の影響



第2図 下流側傾斜が異なる場合の比較

第3図は、直線斜面において、下流端が平坦な場合と急勾配の場合とを比較したものである。後者は、例えば承水路が存在する場合で、下端に流れ着いた土砂や水がほとんど流れ去る状況に相当する。したがって、下端では、*TCAP* が急激に増大している。結果をみると、前者の場合、下端で大量の堆積が生じているのに対し、後者では下端においてむしろ侵食が生じている。下端においてこのように堆積が生じるか否かは、その後の侵食に大きく影響するものと考えられる。

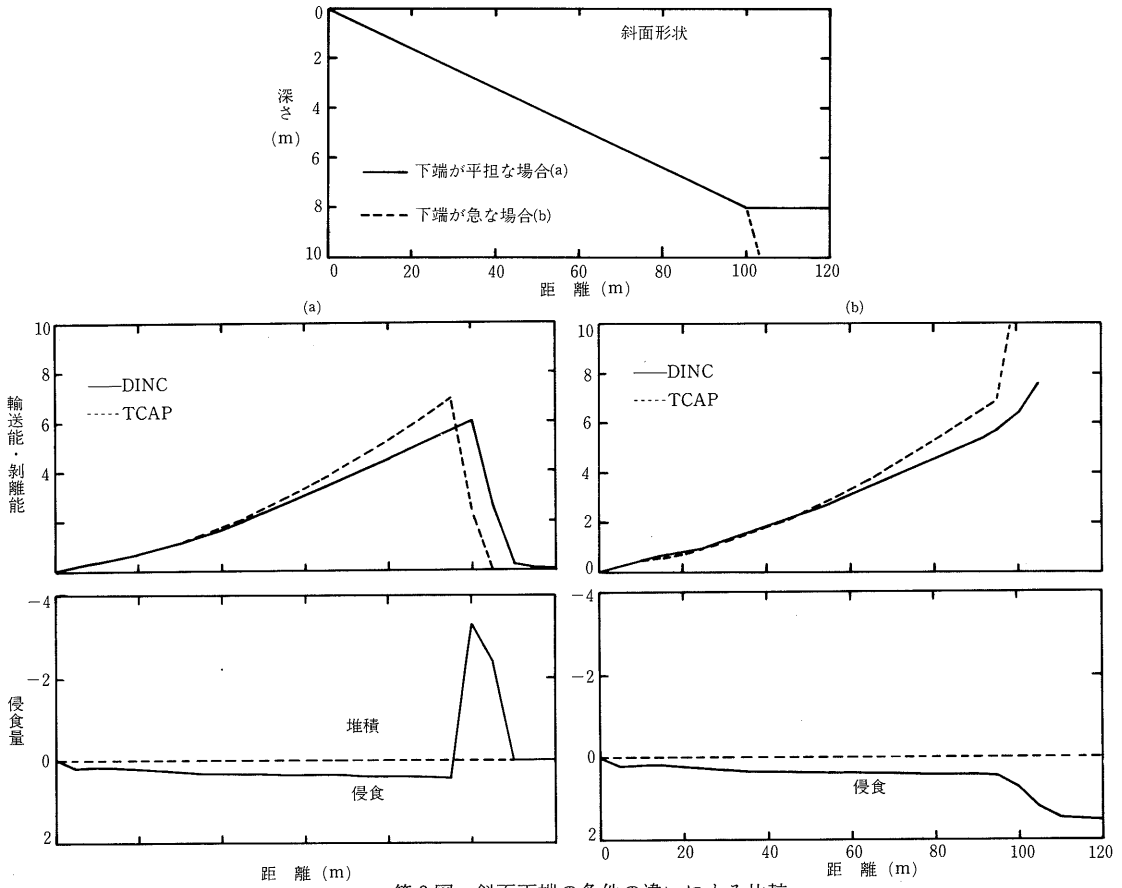
4. 2回の降雨があった場合

降雨後の斜面形状は、土砂の移動で生じた侵食や堆積によって降雨前の形状とは異なる。その場合、深さの変化量は、侵食量を土壤の乾燥密度で除した値になるが、ここでは、侵食量の0.7倍の分だけ深さが変化するものと

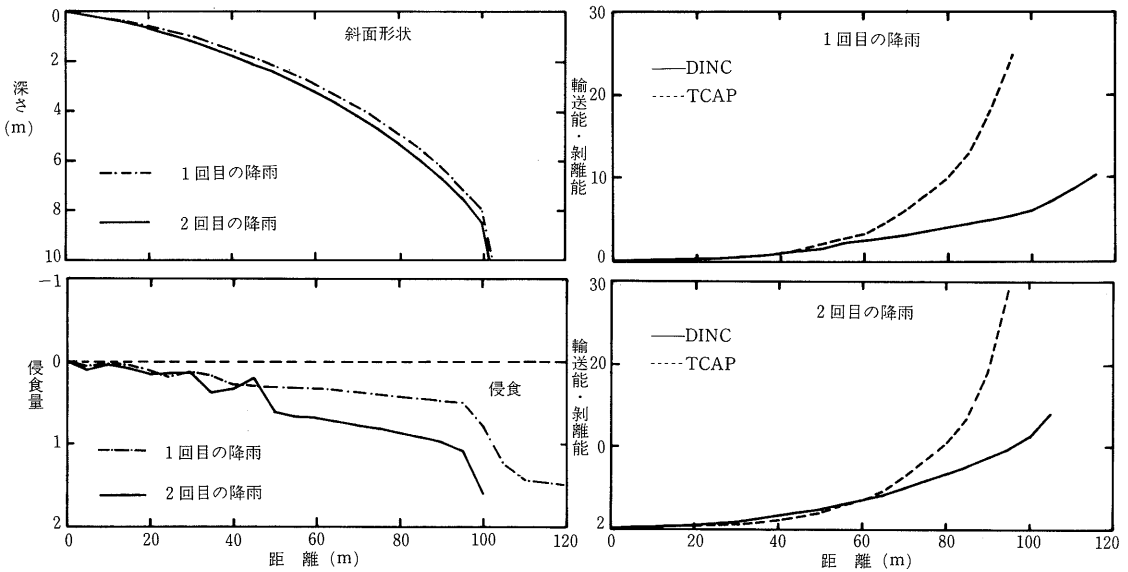
して、2回目の降雨侵食に対するシミュレーションを行った。また、本モデルでは斜面勾配が正の場合については計算が行えないので、ここでは凸状斜面を対象とした。計算結果を第4図に示す。1回目の降雨に比べて、2回目の降雨の方が *TCAP*, *DINC* ともに下流側で大きくなっている。その結果、50m以上の距離のところから下流側で侵食量も大きくなっている。

5. スロットマルチがある場合

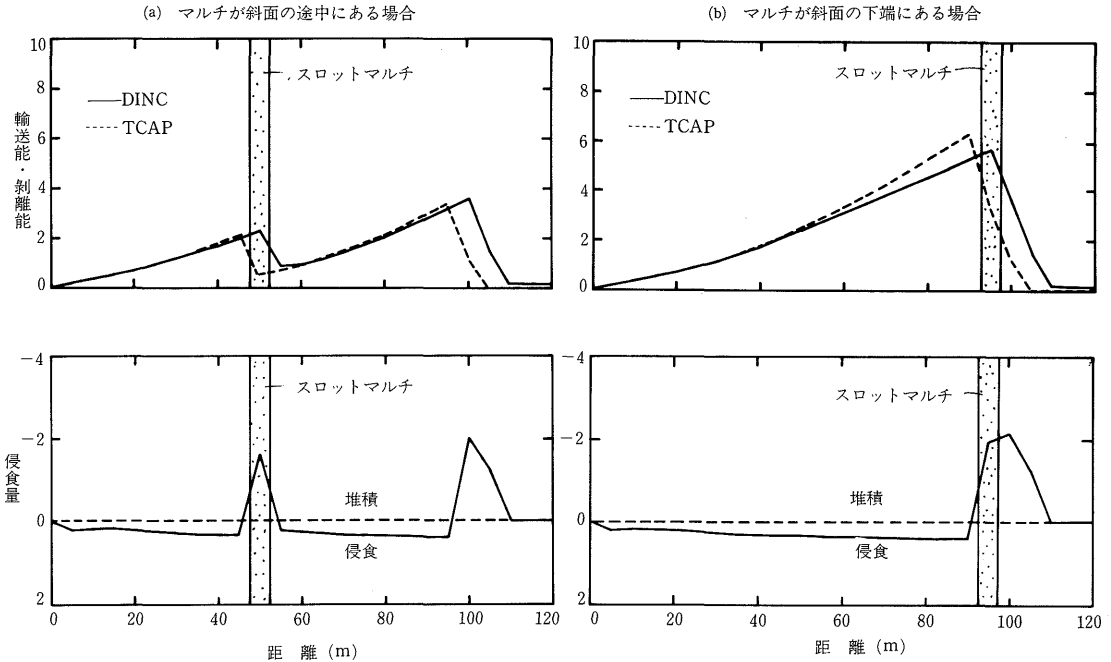
スロットマルチとは、斜面の等高線に平行に作られた溝に麦わらのような作物の残滓を詰め込むことによって、浸潤量を増大させ、さらに侵食量を減少させるためのマルチングをいう。実際のスロットマルチは、4~6m間隔で設置されるが、ここでは、このマルチの効果を知るため、マルチが斜面の途中及び下端にある場合に



第3図 斜面下端の条件の違いによる比較



第4図 2回の降雨があった場合の比較



第5図 スロットマルチによる侵食制御

ついて計算を行った。また、スロットマルチの部分の浸潤強度は、斜面の他の部分の値より8倍大きい0.2m/hとした。直線斜面における計算結果を第5図に示す。斜面の途中にスロットマルチがある場合、その地点においてはTCAP, DINCはともに激減している。その地点を通過すると再びTCAP, DINCは大きな値になる。スロットマルチが斜面下端にある場合は、途中にある場合に比べて2倍近くまでTCAPの値が大きくなっている。侵食量を比べてみると、マルチが途中にある場合、その地点で堆積が生じているにもかかわらず、下端においてもかなりの堆積が生じているが、その量はマルチが下端にある場合よりは小さかった。

考 察

一般に、畑地で観察する侵食は、侵食後の状況であって、侵食時のものではない。また、枠試験にしても、侵食は各降雨時に起こるから、降雨量、流出土量は測定で知り得ても侵食時における土壌の変化については知り得ない。このようなことが、侵食に対する数学モデルの開発を困難にしているように思われる。そのような中で、Meyer and Wischmeierのモデルは、数学モデルの端緒を与えるものであり、定常モデルとはいえ、定性的な

特徴を調べるのには十分に使用できる。

本研究では、まず凹状斜面と凸状斜面における侵食を比較した(第1図)。侵食量でいうと、凸状斜面の方がはるかに大きいようである。(2), (4)式から分るように、侵食量は斜面勾配と水の流量に大きく依存している。凸状斜面の場合、上流部では斜面勾配が小さく、流量も小さいためほとんど侵食は生じないが、下流に行くにつれて勾配と流量は共に増大するので侵食量も増大する。また、凹状斜面の場合、上流部では勾配は大きい流量は小さく、逆に下流部では勾配は小さいが、流量は大きくなる。それ故、侵食に対する勾配と流量の影響が上流でも下流でも相殺することになる。凹状斜面の途中で侵食と堆積が繰り返されているのは、このためであろう。

このような結果から、例えば圃場周囲の法面等は、斜面が安定していて法面頂部を越流する流れがない限り、凹状にするのが望ましいと考えられる。

一般に、斜面形状を凸状あるいは凹状として、断定的に呼び続けることはできない。斜面形状は、侵食が進むにつれて変形するものである。例えば、凸状斜面について考えると、侵食は下流端において最も大きい、そこでの侵食が発展するにつれて、斜面勾配の最も急な部分は次第に上流側へと移行していく。その結果、最終的に

は凸状斜面は凹状斜面へと変形することになる。

第2図に示したように、下流側斜面勾配の違いは、輸送能に大きく影響し、侵食の制限因子は剝離能になる。したがって、剝離され易い土壤の場合、下流側傾斜が大きいととくに侵食量が増大することが予想される。このように途中で勾配が異なる斜面を設計する際には、屈折部分で承水路を設けるなどして、急な斜面への地表流量を減少させることが必要であろう。

下流端の勾配が急な場合のシミュレーション結果(第3図)では、下流端の勾配が平坦な場合と比べて大きな変化が見られる。すなわち、下流端の最後の区分において侵食が急増している。このことは、下流端での急な斜面勾配が上流に向かって伝達していくことを示唆している。そこで、降雨が2回ある場合を考えて計算を行った。1回目の降雨で生じた侵食によって、斜面形状が変化し、その結果2回目の降雨による侵食量も1回目の降雨の場合に比し増大していることが明らかである(第4図)。ここでは、定常モデルを用いているため、侵食量の詳細な変化過程を推定することはできないが、結果から判断しても、下流端の影響が上流端に向かって伝わっていることが十分に予測できる。このモデルにおいては、リルとインターリルとは区別されていないが、リルの場合、下流から上流に向っての斜面変化の伝達がとくに顕著であろう。従来、リルの発達に関しては、下流から上流に向うものか、上流から下流に向うものかの議論があり、前者の方が実証的には支持されている¹⁾が、本シミュレーションでもそれを支持する結果が得られた。このように、リル侵食に関しては、下流端の影響が大きく、逆に言えば、下流端を十分に保護すればリルはそれほど発達しないものと考えられる。

従来、侵食におけるマルチの目的は、雨滴侵食を抑制し、地表流出をコントロールし、水の浸潤を維持することにある²⁾が、ここで計算の対象としたスロットマルチは、浸潤量を増大させ、それによって地表流を大きく減退させようとするものである。スロットマルチが斜面の中腹にある場合と斜面の下端にある場合との比較を行ったが、いずれの場合もマルチの部分で堆積が生じている(第5図)。斜面下端における堆積量は、最大値にそれほど差がないが、全堆積量は下端にマルチがある方が大きくなっている。したがって、斜面の途中にスロットマルチを設けることによって、土砂の堆積を斜面に分散させることが可能であるといえる。

ま と め

Meyer and Wischmeierによって提出された土壤侵食の定常モデルを用いて、斜面のいろいろな条件に対するシミュレーションを行った。その結果を要約すると次のとおりである。

- 1) 同じ降雨強度条件下でも、凹状斜面の場合は凸状斜面の場合よりも侵食量が小さくなる。
- 2) 下流側斜面勾配が大きく、斜面長が短い場合は、斜面勾配が小さく、斜面長が長い場合よりも侵食量が大きい。
- 3) 斜面の下端が平坦な場合は、そこで堆積が生じるが、下端が急勾配の場合は、流出土砂が流去し、侵食が生じる。
- 4) 2回の降雨がある場合、2回目は1回目よりも侵食量が増大する。
- 5) スロットマルチを設置すると、その部分で堆積が生じるため、侵食量が減じる。また、堆積土はスロットマルチ部に分散させることが可能である。

Meyer and Wischmeierは、すでに斜面侵食に関して、降雨強度、斜面の不規則性、土壤の剝離性等の侵食に対する影響を明らかにしている。したがって、それらの結果と上述の結果とを併せて考えれば、土壤侵食に対するより広範な判断が可能になろう。

Meyer and Wischmeierのモデルは、定常モデルであるため改良の余地が多々ある。例えば、このモデルでは、斜面勾配が負の場合では使用できないし、(1)~(4)式に含まれる係数の決定も難しい。侵食モデルの代表であるUSLEに比べると、このモデルは実用性に乏しいが、侵食現象を細かく見ていく立場からは尊重される。侵食は、侵食性、受食性及び斜面形状が経時的に変化する動的なシステムにおける挙動であるので、そのような立場が一層大切であるように思われる。

文 献

- 1) 第2回農地保全研究会報告、農業土木学会誌 50 709-716 (1982)
- 2) Hudson, N.: *Soil conservation*. 1st ed., B T Batsford, London (1971) pp. 220-221
- 3) Meyer, L.D. and Wischmeier, W.H.: Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Trans. ASAE*, 12 754-758, 762 (1969)
- 4) Saxton, K.E., McCool, D.K., and Papendick, R. I.: Slot mulch for runoff and erosion control. *J.*

- of Soil and Water Cons.*, **46** 44-47 (1981)
- 5) Youngs, R.A. and Mulchler, C.K. : Soil movement on irregular slopes. *Water Resour. Res.*, **5** 1084-1089 (1969)