

人工降雨装置による斜面侵食に関する研究(VI)

土の中央粒径および標準偏差の影響

井上章二*

Experimental Studies on Soil Erosion Using Simulated Rainfall (VI)

On the influences of the median diameter
and the standard deviation of the soil

Shoji INOUE

Summary: The size of soil particles is closely related to soil erosion, and particle size is used as a factor of resistance against the external force on soil erosion in some formulas for the estimate of sediment yield. But the influence of the distribution and size of soil particles on soil erosion has not been reported.

In this investigation, median diameter was used as an index of particle size and standard deviation was used as an index of the distribution and size of soil particles. Experiments on soil erosion on an experimental slope were carried out using simulated rainfall in order to clarify the effects of particle size distribution of the soil. The soil materials in these experiments consisted of decomposed granite with three varieties of median diameter at the same standard deviation, and with three varieties of standard deviation at the same median diameter.

The results may be summarized as follows :

- 1 . Sediment yield increased as the median diameter of the soil decreased.
- 2 . Sediment yield was in inverse proportion to the standard deviation of the soil.
- 3 . The results of multiple regression analysis showed that sediment yield had a significant relation to rainfall intensity, median diameter and standard deviation of the soil.
- 4 . The formula for the estimate of sediment yield proposed by Iwagaki et al⁵⁾ does not account for influence of the condition of the same median diameter of the soil. The writer proposed the following improved formula :

$$\frac{q}{u_* \cdot d_{50} \cdot s} = A \left\{ \frac{u_*^2}{(\sigma / \rho - 1) \cdot g \cdot d_{50} \cdot s} \right\}^B$$

* 森林工学研究室 Laboratory of Forest Engineering

where, q =sediment yield ($\text{cm}^3/\text{cm}/\text{sec}$),
 u_* =shear velocity (cm/sec),
 d_{50} =median diameter of the soil (cm),
 s =standard deviation of the soil,
 σ / ρ =specific gravity of the soil,
 g =acceleration of gravity (cm/sec^2),
 A and B =constants.

要 旨 ノリ面の表面侵食と土の粒径とは密接な関係があり、侵食量実験式の中には、侵食の抵抗力要因として土の中央粒径を考慮したものがある。しかし、ノリ面を構成している土は、大小さまざまな土粒子の集合体であり、その粒径の広がりや侵食に対してどのように影響をおよぼすのかは、現在までのところ解明されていない。本研究では、土の粒径の指標として中央粒径を、粒径の広がりやの指標として標準偏差を選び、それぞれが侵食におよぼす影響を解明するため、標準偏差一定で中央粒径が3種類、中央粒径一定で標準偏差が3種類となるように調整したマサ土を供試土としてもちい、人工降雨装置を利用した室内実験をおこなった。その結果を要約すれば以下のようである。

- 1) 供試土の標準偏差が一定のとき、中央粒径が小さいほど流出土砂量は多くなる。
- 2) 中央粒径が一定の場合は、標準偏差が小さいほど流出土砂量は多くなり、両者は反比例の関係にある。
- 3) 流出土砂量を従属変数、降雨強度、斜面コウ配、土の単位体積重量、土の中央粒径および標準偏差の5因子を独立変数として重回帰分析をおこなった結果、流出土砂量は降雨強度、土の中央粒径および標準偏差の3因子と有意な関係が認められた。
- 4) 中央粒径が一定で標準偏差が異なる土に対しては、岩垣ら⁵⁾が提案した実験式は適合しなくなり、標準偏差の因子を考慮して今回提案した次の改良式は高い適合性を示した。

$$\frac{q}{u_* \cdot d_{50} \cdot s} = A \left\{ \frac{u_*^2}{(\sigma / \rho - 1) \cdot g \cdot d_{50} \cdot s} \right\}^B$$

ただし、 q は単位幅、単位時間あたり流出土砂量、 u_* は流れの摩擦速度、 d_{50} は土の中央粒径、 s は土の標準偏差、 σ / ρ は土粒子の比重、 g は重力の加速度、 A および B は定数である。

I はじめに

ノリ面の表面侵食に対する抵抗力要因の中で、土の粒径分布が流出土砂量に大きな影響をおよぼす因子の一つであることを既に報告⁴⁾したが、その影響が粒径そのものによるものか、あるいは粒径のパラツキの大きさによるものかは不明確であった。また、これまでに提案されている侵食量実験式の中には、土の粒径分布の因子として、中央粒径を考慮に入れているものはあるが、土の標準偏差の影響力については、ほとんど報告されていないのが現状である。そこで本報では、土の中央粒径と標準偏差とを区別して、それぞれの影響力について検討した結果を報告する。

本研究の実施にあたり、ご指導、ご助言を賜っている九州大学農学部、末 勝海教授をはじめ砂防工学研究室の方々、愛媛大学農学部、伏見知道教授、小川 滋助教授に対してここに深く感謝の意を表す。さらに、実験にあたっては、愛媛大学農学部演習林、江崎次夫助手をはじめ、藤久正文、尾上清利、河野修一各技官の方々、森林工学研究室専攻生、佐伯彰彦、船ヶ山敏彦の両君にご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

なお、本報告の一部は第94回日本林学会大会（盛岡市）において発表した。

II 実験方法

供試土としては愛媛大学演習林産のマサ土をもちい、一度フルイ分けした後、再度混合することによって、表-

1に示すように粒径分布の異なる5種類を用意した。それぞれの粒径加積曲線を図-1に示す。また、ここでいう中央粒径とは粒径加積曲線の50%を示す粒径のことであり、標準偏差とは $\sqrt{84\%粒径/16\%粒径}$ のことである。

実験ノリ面は幅50cm、長さ150cm、深さ20cmの木製の箱に供試土を入れ、ローラーの転圧によって締固め、それを傾斜した台に載せたものである。斜面コウ配は30°と40°の2種類とした。この実験斜面上方11.5mに設置した人工降雨装置³⁾によって実験中一定の強度を維持する矩形分布の降雨を与え、斜面下端で地表流水および流出土砂を受け、その量を10分ごとに測定した。このとき、箱の側面の影響を除くために、中央30cmと両端10cmずつに分割して測定し、今回の実験データとしては中央30cm部分で測定されたものを採用した。その他実験方法の詳細は前に報告⁴⁾したとおりである。実験条件をまとめると表-2のようである。

III 実験結果および考察

1) 中央粒径の影響

今回あらたにおこなった10回の実験では、土の粒径分布の影響を明らかにすることが目的であったことから、降雨強度は60mm/hrで各実験一定にした。その結果、図-2に示すように、地表流出水量も各実験でほぼ一定となった。

図-3は標準偏差が一定で中央粒径が異なる供試土の実験における流出土砂量の経時変化について、コウ配が30°と40°の場合を表わしたものである。コウ配30°では、中央粒径が小さいほど流出土砂量は多くなっているが、これには次のような理由が考えられる。土粒子が移動を開始するときの地表流水の掃流力は小粒径の土粒子ほど小さく、したがって同じ掃流力であれば、小粒径のものが多く移動することになる。また、雨滴の衝撃によって移動を開始した土粒子が、地表流水の中に投げられた場合には、移動している粒子の停止しやすさが問題となる。すなわち、雨滴衝撃によって移動した粒子も、停止限界粒径¹⁾より大きな土粒子はそれ以上下流へ移動せず、停止してしまうことになる。

表-1 供試土の諸元

供試土記号	A	B	C	D	E
中央粒径(mm)	0.20	0.40	0.60	0.40	0.40
標準偏差	5.7	5.9	5.8	2.2	10.0
比重	2.64				

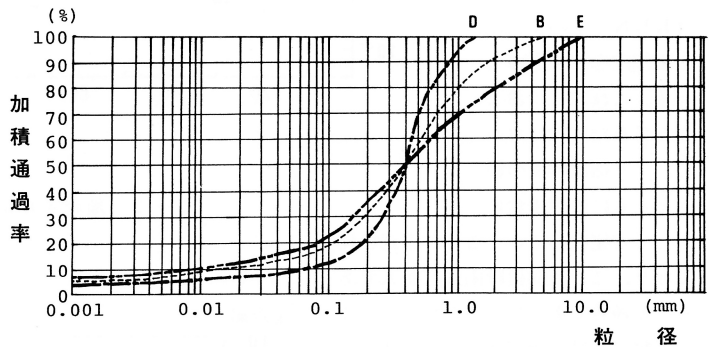
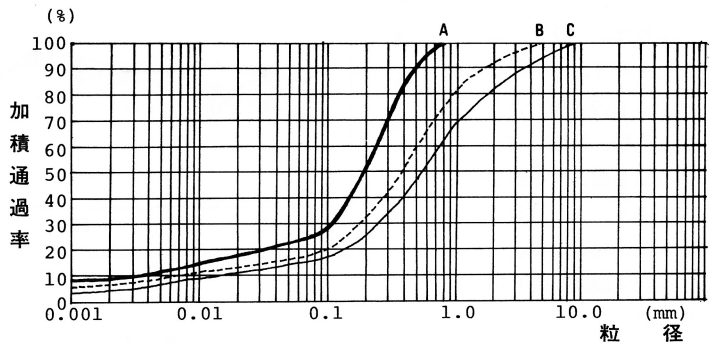


図-1 供試土の粒径加積曲線

表-2 実験条件

	斜 コ ウ 配 (°)	降雨強度 (mm/hr)	降雨時間 (min)	土の単位 体積重量 (g/cm ³)	供 試 土 記 号
RUN-1	30	60	100	1.32	A
RUN-2	"	"	150	1.26	B
RUN-3	"	"	50	1.40	C
RUN-4	"	"	80	1.28	D
RUN-5	"	"	120	1.38	E
RUN-6	40	"	50	1.26	A
RUN-7	"	"	70	1.28	B
RUN-8	"	"	110	1.38	C
RUN-9	"	"	"	1.25	D
RUN-10	"	"	"	1.43	E

コウ配40°の場合は、中央粒径が今回の実験中最大である0.6mmのときに、最小の0.2mmとほぼ同じ流出土砂量が認められた。これは、各実験、同様の方法で締固めてはいるものの、ある程度のバラツキはやむを得ず、その影響によるものと推察される。今後、締固め方法の改良を検討する必要があるであろう。また、コウ配30°の場合は流出土砂量は実験開始後10分間が最も多く、しだいに減少していく傾向であるのに対し、40°ではRUN-7のように漸増傾向を示すものもある。これまでにおこなってきた実験において、ノリ面は時間の経過とともに表面侵食に

対して安定化していくことが確認されており、この傾向は降雨強度が大であるほど顕著であった。したがって、この実験における降雨強度では、30°の場合はノリ面の安定化が速やかに進行し、40°の場合は安定化に向うまでに時間を要するのではないかと判断される。RUN-7においても、このまま降雨を継続すれば、しだいに流出土砂量は減少していくであろう。

2) 標準偏差の影響

中央粒径が0.4mmと一定で、標準偏差が異なる場合の流出土砂量の経時変化を図-4に示す。この実験結果によれば、40°のときに標準偏差5.9(RUN-7)と標準偏差10.0(RUN-10)の場合に逆転しているものの、全体的にみれば、標準偏差が小さいほど流出土砂量は多くなっている。すなわち、マサ土の場合はノリ面の表面侵食に対し

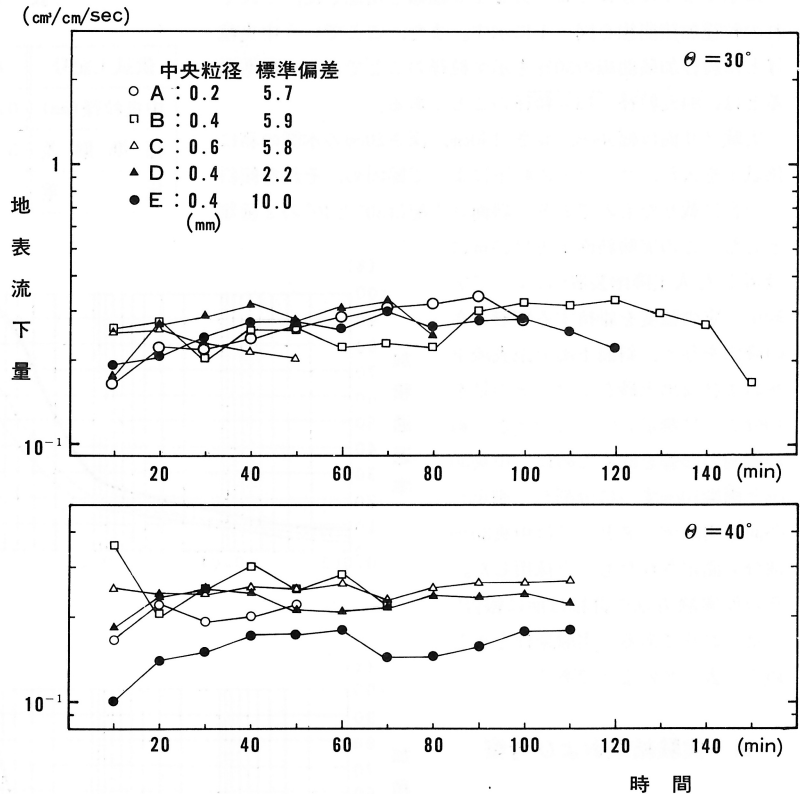


図-2 地表流出水量の経時変化

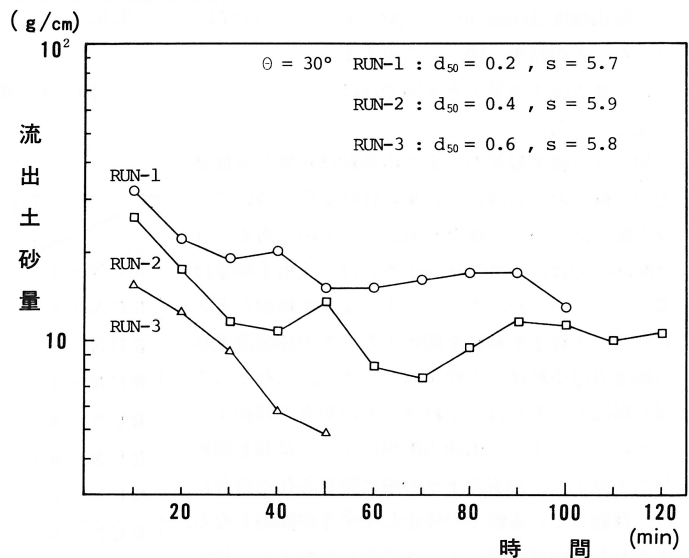


図-3-1 流出土砂量の経時変化(標準偏差一定)

て、粒径バラツキの多い土の方が均一な粒径の土よりも抵抗力が大きいということになる。ところが、海岸における飛砂現象の場合は、標準偏差が小さいほど飛砂量は少なくなると報告⁶⁾されており、今回の侵食実験とは逆の結果となっている。飛砂現象における外力は風によるせん断力であり、ノリ面侵食においては地表流下水の掃流力がこれと対応し、現象的にはかなり類似していると考えられる。しかし、ノリ面侵食においては、雨滴の衝撃力もまた外力としてはたらし、侵食に関して大きなウェイトを占めていると思われる。したがって、粒径範囲の広い土の方が、土粒子間のインターロッキング作用により、雨滴衝撃力に対する抵抗が大きくなるものと推察される。ただし、この実験においては中央粒径が0.4 mmで一定としているが、中央粒径がもっと大きいとき、あるいは小さいときに標準偏差の影響がどのように効いてくるのかということも今後検討する必要があると考えられる。

3) 重回帰分析

以前に実施した実験²⁾において、流出土砂量を従属変数とし、降雨強度、土の単位体積重量、土の含水比および斜面コウ配の4因子を独立変数として重回帰分析をおこなった結果、特に降雨強度および土の単位体積重量の2因子と流出土砂量との間に有意な関係が認められた。本報では、前回の分析で有意性が認められなかった土の含水比の因子を除き、あらたに、土の中央粒径ならびに標準偏差の2因子を独立変数に加え、前回の実験データも含めて以下のような重回帰分析をおこなった。

まず、降雨強度因子については、流出土砂量と10分間最大降雨強度の2乗とが強い相関があることから、前回の分析同様降雨強度の2乗をもちいた。また、土の標準偏差の因子については、図-5に示すように流出土砂量とは反比例の関係にあるため、標準偏差の逆数を変数としてもちいた。そこで、重回帰式を次のように表わす。

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 \dots \dots \dots (1)$$

- ただし、Y : 流出土砂量
- X₁ : 降雨強度の2乗
- X₂ : 斜面コウ配
- X₃ : 土の単位体積重量
- X₄ : 土の中央粒径

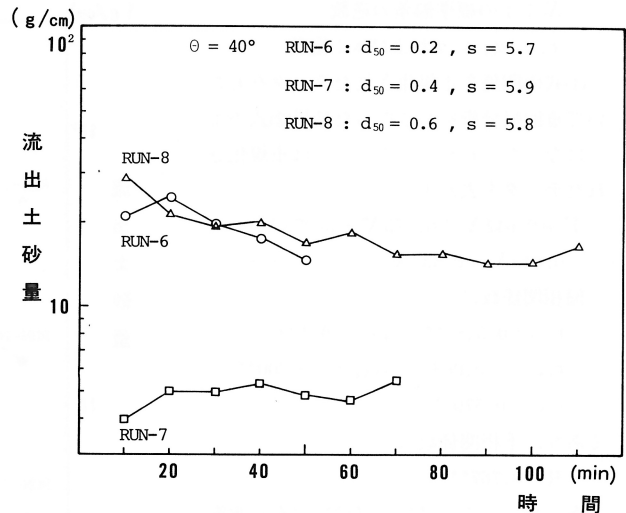


図-3-2 流出土砂量の経時変化(標準偏差一定)

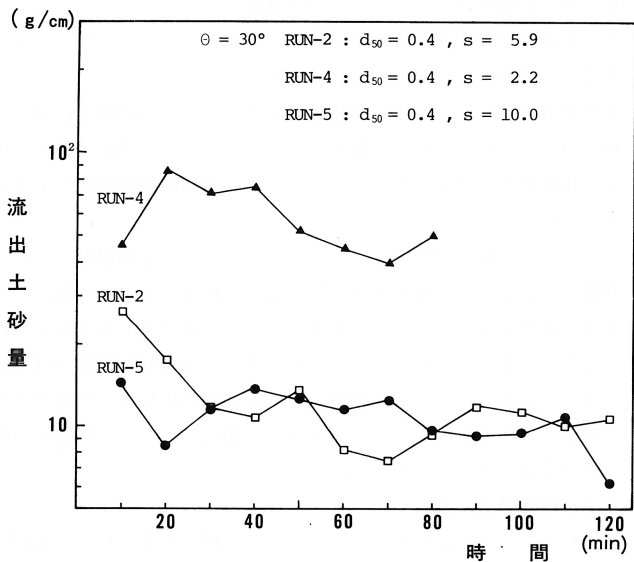


図-4-1 流出土砂量の経時変化(中央粒径一定)

X_5 : 土の標準偏差の逆数

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 および a_5 : 定数

(1)式の関係を正規化されたデータをもちいて重回帰分析をおこなった結果(2)式のようにになった。ただし、ダッシュは正規化されたデータを表わす。

$$Y = 0.642X_1 + 0.175X_2 - 0.075X_3 - 0.843X_4 + 0.533X_5 \dots\dots\dots (2)$$

偏相関係数は、

$$\begin{aligned} r_{YX_1} &= 0.548^{**} & r_{YX_2} &= 0.133 \\ r_{YX_3} &= -0.063 & r_{YX_4} &= -0.700^{**} \\ r_{YX_5} &= 0.570^{**} \end{aligned}$$

であり、重相関係数は

$$R = 0.767^{***}$$

であった。ここで、**および***は有意水準がそれぞれ99%レベル、95.9%レベルであることを示している。すなわち、流出土砂量に強く影響をおよぼすのは、降雨強度、土の中央粒径および標準偏差の3因子であることが判明した。また、前回の分析で有意性が認められた土の単位体積重量の因子は、今回流出土砂量との間に有意な関係は認められなかった。今回の実験では、土の粒径分布の影響を調べるのが主たる目的であり、土の締め固めは各実験ほぼ同じになるようにしたため、中央粒径、標準偏差等の因子と比べて数値の変動範囲が小さいということからこのような結果になったものと考えられる。

さらに、斜面コウ配因子も流出土砂量とは有意な関係はみられなかった。これは図-2、図-3、図-4からも判断できるように、地表流出水量、流出土砂量ともにコウ配以外の条件が等しいときに、コウ配の相違による差があまり顕著でないことから推察できる。斜面コウ配が大きくなれば、ノリ面表面の土砂は下流方向へ移動しやすくなる。しかし、これまでに実施してきた一連の侵食実験では、斜面長を150cmで一定としたために、雨が鉛直に落下する場合にはノリ面全体にはいる降雨の総量は、斜面コウ配が大きくなるほど少なくなり侵食における外力が減少することになる。これら2因子が相殺し合って、斜面コウ配と流出土砂との間に有意な関係を見出すことがみかけ上はできないと考えられる。

4) 侵食量式の検討
 これまでにノリ面侵食量の実験式として種々提案されているが、その中で、侵食現象をある程度物理的に表現したものとして、岩垣ら⁵⁾が提案した次式を挙げることができる。

$$\frac{q}{u_* \cdot d_{50}} = A \left\{ \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1) \cdot g \cdot d_{50}} \right\}^B \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 q : 単位幅、単位時間あたり流出土砂量 (cm³/cm²・sec)

u_* : 流れの摩擦速度 (cm/sec)

d_{50} : 土の中央粒径 (cm)

σ/ρ : 土粒子の比重

g : 重力の加速度 (cm/sec²)

A および B : 定数

この実験式は、侵食の抵抗力要因としては、土の粒径および比重を、外力としては摩擦速度すなわち地表流下水の掃流力を考慮したものである。したがって、式の意味から考えれば、侵食は地表流下水の掃流力のみによって生起するという考えに立脚しており、侵食の外力として重要な因子の一つと考えられる雨滴衝撃力については考慮されていないことになる。そこで、雨滴衝撃力について若干の考察を加える。

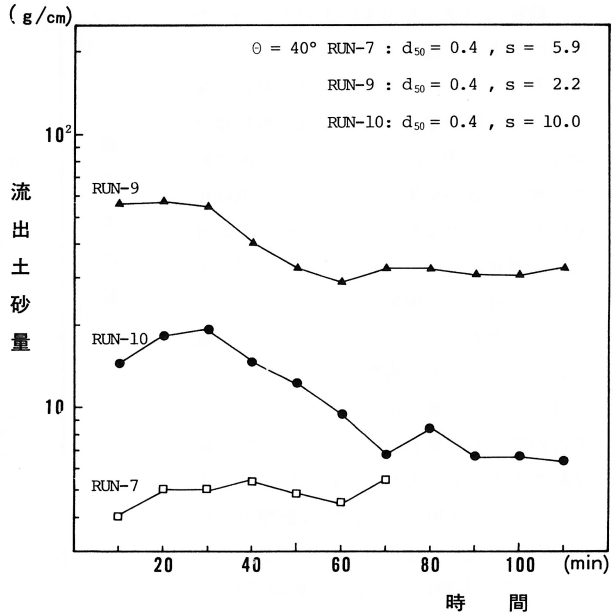


図-4-2 流出土砂量の経時変化(中央粒径一定)

一雨滴の衝撃力を F ，雨滴の質量を m ，加速度を a とすれば，

$$F = m \cdot a \quad \dots\dots\dots(4)$$

であるから，

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3} \pi \rho \left(\frac{D}{2}\right)^3 \frac{dv}{dt} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし， v : 雨滴の終末落下速度

t : 衝撃力の作用時間

ρ : 水の密度

D : 雨滴直径

となる。

一方，雨滴は速度を増しながら落下するが，ある時点で重力，浮力および空気抵抗とがつり合い，その後はこの時の速度を維持する。すなわち，空気密度を ρ' ，重力加速度を g ，抵抗係数を C_D とすれば，浮力を考慮した重力と空気抵抗とのつり合い式は，

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 g (\rho - \rho') = \frac{1}{2} C_D \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \rho' v^2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

となり，(6)式より

$$v^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{g}{C_D} \cdot \frac{\rho - \rho'}{\rho'} \cdot D \quad \dots\dots\dots(7)$$

となる。 C_D はレイノルズ数の関数であるが，今回の実験では定数的に扱うことができ，また， g ， ρ および ρ' も定数とみなすことができるので，雨滴の終末落下速度 v は雨滴直径 D によって変化すると考えることができる。さらに，簡単のため，衝撃力の作用時間 t が雨滴直径 D に比例すると考えれば，(5)式より，一雨滴の衝撃力 F は雨滴直径 D によって決定されるといえる。ところが，自然降雨では降雨強度がある値以上のときは降雨強度が大きくなれば大きな径の雨滴が多少は増加するものの雨滴径の分布はそれほど変化せず，本研究にもちいた人工降雨装置においても，降雨強度による雨滴径分布の変化はほとんどみられない。したがって，連続降雨によって一定時間にノリ面が受ける全雨滴衝撃力は雨滴径よりも雨滴数によって大きく影響されると考えられる。

以上のことより，ノリ面の状態が一定であれば，(3)式における摩擦速度の増加は降雨強度の増加を意味するので，雨滴衝撃力も増加することになる。つまり，(3)式は物理的には地表流下水の掃流力による土砂の流出を表現したものであるが，実用的には雨滴衝撃力の影響を内在した実験式である

表-3 (3)式による回帰分析結果

	A	B	相関係数
標準偏差一定	0.115	0.940	0.60***
中央粒径一定	0.142	0.596	0.19
全 体	0.144	0.973	0.53***

そこで，(3)式を今回の実験データに適用するにあたって，さらに検討を加えると，今回の実験では地表流下水量は各実験ともほぼ同量であったため，摩擦速度も一定となり，土の中央粒径が一定の場合は右辺の数値に変動が少なく，(3)式は適合しなくなると推定される。実際に今回の実験データをもちいて回帰分析をおこなうと表-3に示す結果となり，相関はよくない。これは，(3)式の中に土の粒径分布を表わす因子として標準偏差が考慮されていないからである。この回帰分析にあたって，摩擦速度の計算は既に報告¹⁾した方法により，さらに，必要な定数の値は $\sigma/\rho = 2.64$ ， $g = 980(\text{cm}/\text{sec}^2)$ をもちいた。この結果から判断すると，中央粒径にあまり差がなく，標準偏差のパラッキの大きい土壌に対しては，(3)式はこのままでは利用できないので，(3)式内に何らかの形で標準偏差の因子を入れる必要がある。

中央粒径が一定のときに，標準偏差の大小が(3)式の定数 A ， B とどのような関係にあるのかを回帰分析により調べてみると，標準偏差の増加にともなって定数 A ， B ともに減少することがわかった。このことは(3)式の形から判断して，標準偏差が大きくなると，同じ摩擦速度でも土砂の流出が少なくなることを意味している。これは図-5からも明らかであり，さらに，標準偏差が増

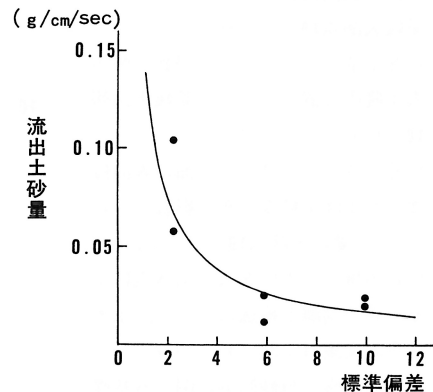


図-5 流出土砂量と標準偏差との関係

加すると土の粒径範囲が広がり、表面粗度が大きくなって掃流力に対する抵抗力が増加すると考えられる。上記のことを考慮し、(3)式に標準偏差の因子を加えて次式のように表わす。

$$\frac{q}{u_* \cdot d_{50} \cdot s} = A \left\{ \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1) \cdot g \cdot d_{50} \cdot s} \right\}^B \dots\dots\dots(8)$$

ただし、 s : 土の標準偏差

$q/u_* \cdot d_{50} \cdot s$ と $u_*^2/(\sigma/\rho - 1) \cdot g \cdot d_{50} \cdot s$ との関係をプロットしたのが図-6である。(8)式をもちいて回帰分析をおこなうと表-4のような結果となる。(3)式の場合と比べてかなりよく適合しており、標準偏差を考慮に入れた(8)式が、より普遍的に利用できるのではないかと考えられる。

IV おわりに

ノリ面の表面侵食に対して、土の粒径のみならず、粒径のバラツキ程度もまた、大きな影響力を有することが本実験で明らかになり、土の標準偏差の因子を取り入れ、流出土砂量式の改良を試み、一応良好な成果が得られた。しかしながら、本実験でもちいた土の粒径範囲も限られたものであるため、さらに粒径範囲が広がったときに、流出土砂がどのように変化するかは不明確であり、今後、実験式の適用限界を明らかにしていくつもりである。

引用文献

- 1) 井上章二：人工降雨装置による斜面侵食に関する研究(Ⅲ)．92回日林論：423～424，1981。
- 2) 井上章二：人工降雨による盛土ノリ面の表面侵食に関する実験的研究．愛媛大演報18：81～88，1981。
- 3) 井上章二・江崎次夫：侵食実験用人工降雨装置について．愛媛大演報18：179～184，1981。
- 4) 井上章二：マサ土ノリ面の表面侵食におよぼす粒度分布の影響について(Ⅱ)．愛媛大演報19：51～58，1982。
- 5) 岩垣雄一・土屋義人：雨水流による土砂の剝離と輸送について．土木学会論文集51：34～40，1957。
- 6) 中島勇喜：飛砂制御に関する基礎的研究．九州大演報51：125～183，1979。

表-4 (8)式による回帰分析結果

	A	B	相関係数
標準偏差一定	0.107	0.965	0.62***
中央粒径一定	0.205	1.283	0.82***
全 体	0.204	1.229	0.83***

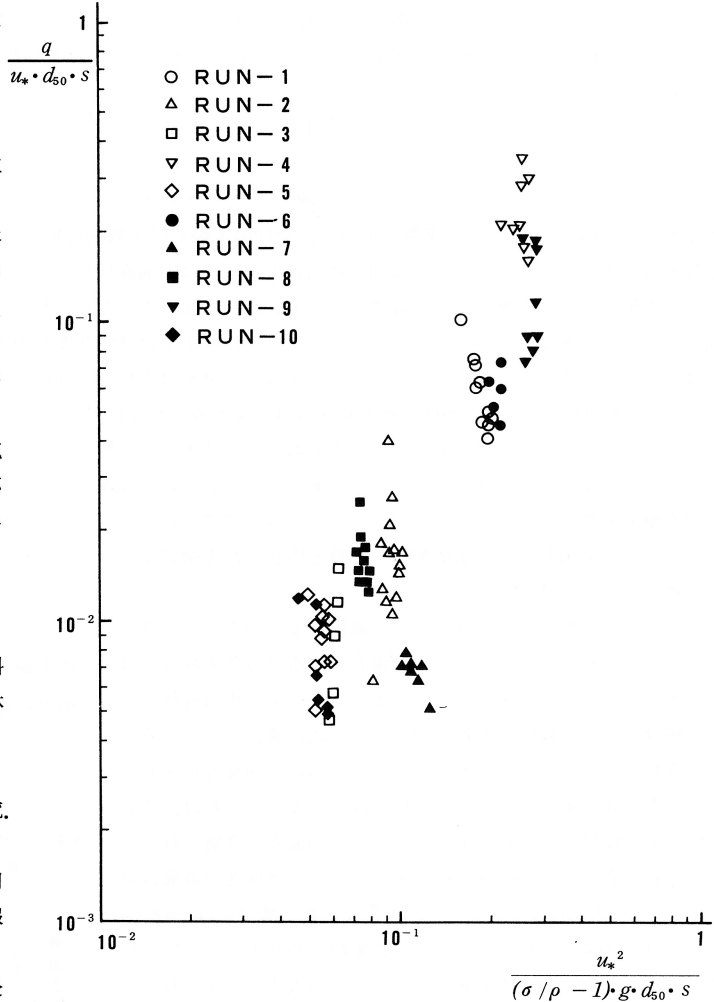


図-6 $\frac{q}{u_* \cdot d_{50} \cdot s}$ と $\frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1) \cdot g \cdot d_{50} \cdot s}$ との関係

(1983年8月31日受理)