

水滴による地面浸食に関する二、三の実験

正員 岩垣雄一*
准員 土屋義人**

要旨 雨水による地面浸食の過程の一部である雨滴浸食の機構を調べるには、落下する雨滴の浸食力および土の耐食性を実験的に明らかにする必要がある。この論文は、砂あるいは砂質土からなる平らな面の一滴の人工水滴による浸食を取扱つたもので、乾燥状態、湿潤状態および表面水がある場合の浸食量が測定された。実験の結果、浸食量がほぼ水滴の運動量に比例することともに、砂および砂質土の空隙率および含水比ならびに表面水の水深が非常に浸食量に影響することがわかつた。また表面水がある場合、砂面が落下する水滴によつて攪乱されなくなる限界の水深に対する実験式を提案し、さらに実験結果にもとづいて地面の保全に関する若干の考察を行つた。

1. 序論

雨水による地面浸食の過程は、まず雨滴がその質量に比例し速度の2乗に比例する運動のエネルギーをもつて地表面を打ち、運動量の時間的変化にもとづく衝撃力によつて土砂を飛散せしめ、地表から土砂を剝離(Detachment)し、また土塊をこまかく破壊するときに始まる。土塊の破壊現象は表面水を泥水と化し、それに含まれるシルトあるいは粘土物質によつて、地面の空隙があさがれて滲透能が減少するいわゆる Surface-sealing process がおこなわれる。この現象によつて地表流出量が増し、剝離された土砂を輸送することによつて地面浸食が進行してゆく。このような浸食過程の外に、表面流による輸送がなくても、地面が傾斜しているとか、雨滴が地面に斜めにあたる場合には、雨滴による土砂の飛散作用のみによつても、土砂は輸送され地面は浸食される。W.D. Ellison¹⁾ が10% の勾配をもつ斜面に人工降雨を与えた、雨滴による土砂の飛散量を特別に考案したSampson²⁾ を用いて測定した結果によれば、飛散量の約1/4 が斜面の下側から上側に運ばれ、約3/4 が上側から下側へ運ばれることがわかつた¹⁾³⁾⁴⁾。結局雨滴による土砂の飛散によつても、地表面の土砂は徐々に斜面のふもとの方へ運ばれ、斜面は少しづつ浸食されてゆくことになる。また同じ Ellison の実験によつて、5.1 mm の大きさの雨滴が 18 ft/sec の速度で落下するときには、土砂は最大 5 ft の距離まで飛散し、4 mm の大きさの石片は 8 inch, 2 mm の土塊は 16 inch も飛び散ることが明らかにされている。このように雨滴による地表面の攪乱力は非常に激しく、この雨滴の土塊破壊力を利用して逆に土壤構造の安定度を決めようとする試みもなされている⁵⁾。

著者らは雨滴による地表面の浸食力を明らかにし、浸食の機構を調べるために、一滴の人工水滴による浸食量(洗掘され飛散する量)を乾燥土砂、湿潤砂および表面水のある場合について詳細に測定し、その結果をもとに地面の保全に対する二、三の考察を行つた。

2. 実験方法

(1) 水滴の発生 一定の水位を保つ小さい水槽から導いたゴム管の先に太さの異なる数種のガラス管を接続することによつて、色々の大きさの水滴を発生せしめ、また落下速度を変化させるため、水滴発生装置を約1.5 m から 7.1 m までの高さに種々変えて取りつけた。水滴径の測定は、これを完全な球とみなし、容積を測つて算出した。水滴の落下速度は多くの人々によつて研究されているが⁶⁾、最も完全な測定は P. Lenard⁷⁾ と Wilhelm Schmidt⁸⁾ のものであるといわれている。しかし J. Otis Laws⁹⁾ はストロボカメラを用いて詳細な実験を行つたところ、Lenard および Schmidt の測定値より 15% 大きくあらわれ、彼等のものが大きい誤差をもつてゐることを明らかにした。そこで著者らは Laws の実験結果をもとにして作つた 図-1 および 図-2 から、落下高および水滴径を与えて落下速度を求めるにした。

この実験に用いた水滴径は約 3.0~6.4 mm の範囲のもので、落下速度は最大約 9 m/sec に及んだ。

(2) 実験資料 実験は乾燥および湿潤状態の砂および砂質土の場合と表面水がある砂の場合との二つに分けて行つた。前者の乾燥砂に対する測定には、平均粒径が 0.19 mm (粒径範囲 0.05~0.32 mm), 0.30 mm (粒径範囲 0.22~0.39 mm) および 0.52 mm (粒径範囲 0.23~0.62 mm) の3種類の砂を用いた。また後者の表面水のある場合の実験は、粒径がなるべく一様になるようにし、平均粒径 0.161 mm (80~100 mesh), 0.271 mm (48~60 mesh), 0.323 mm (42~48 mesh), 0.767 mm (20~24 mesh), 1.08 mm (14~16 mesh), 1.82 mm (9~

* 工学博士 京都大学助教授 ** 京都大学大学院学生；工学部土木工学教室

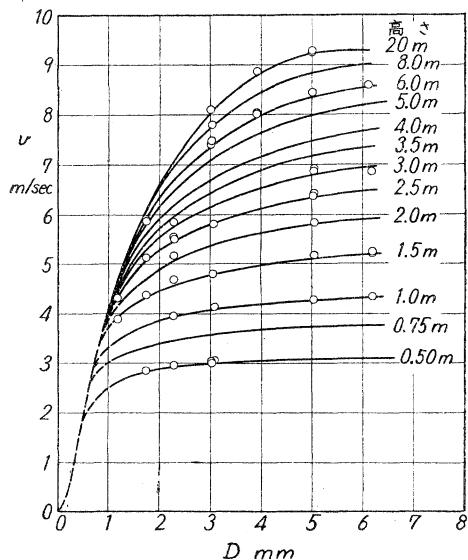


図-1 高さをパラメーターとした水滴の落下速度と水滴径の関係
Fig.1 Relation between falling velocity and diameter of a water-drop with different falling heights

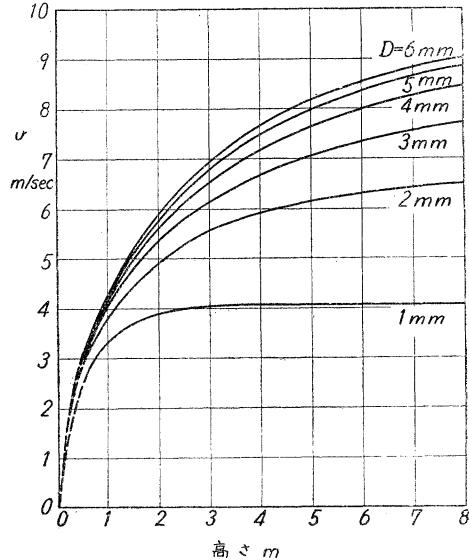


図-2 水滴径をパラメーターとした水滴の落下速度と高さの関係
Fig.2 Relation between falling velocity and falling height of a water-drop with different drop diameters

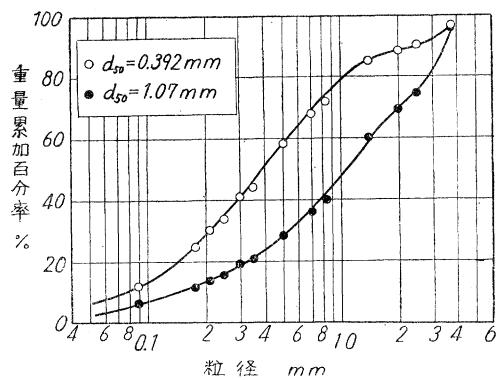


図-3 実験に使用した砂質土のフリイ分ケ加積曲線
Fig.3 Sieve analysis-curves of used sandy soils

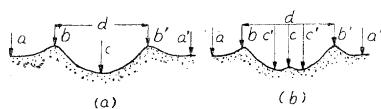


図-4 ポイントゲージによる浸食面の測定位置
Fig.4 Positions where eroded surface is measured by point-gauge

易化するため、すべて球面と仮定して図に示されている位置の高さを $1/10 \text{ mm}$ 読みのポイントゲージを用いて測定し、直径 d の測定はスケールを用いた。そしてこれらの測定値から浸食量を計算して求めた。

水滴による浸食深さは表面から最大 5 mm 程度であるから、表面附近の含水比とか空隙率の測定は非常に困難である。それ故ここではシャーレ中の砂または土について求めた平均値を採用した。

(4) 表面水のある場合の浸食量の測定 浸食量を測定する方法は(3)の場合と全く同様であるが、ただ表面水があるために水滴の落下によつて波を生じ、シャーレが小さいとその壁面での反射波の影響が入るから、乾湿

10 mesh), 3.65 mm (5~6 mesh) および 4.33 mm (4~5 mesh) の 8 種類の砂について行つた。ただし表面水の水深と浸食量との関係についての測定には、全部の砂について行わなくともその特性が十分明らかにされたので、平均粒径 0.323 mm のものについての実験は行わなかつた。なお土の場合の資料を得るために、大戸川流域の表土 2 種類 (いずれも砂質土) を用い、乾湿砂の場合と同じ実験を試みた。これらの土のフリイ分ケ加積曲線を図-3 に示す。累加百分率 50% の粒径 d_{50} はそれぞれ 0.392 mm および 1.07 mm である。

(3) 乾湿土砂に対する浸食量の測定 ここで浸食量というのは一滴の水滴の衝撃によつて、砂および土の面が洗掘される体積と定義する。この場合圧縮によつて砂および土の表面にへこみができることも考えられるが、一般にここに定義した浸食量をもつて飛散した量あるいは浸食部の周囲に堆積した量 (見かけの容積) とみなすことができよう。

試料は測定の便宜のためシャーレに入れ、かつなるべく大きいシャーレを用いて正常の浸食にできるだけ近くするようにした。乾湿土砂の場合に用いたシャーレは直径 10 cm のものである。図-4 に水滴による浸食面の概略の断面形を示したが、大体において浸食面は球面とみなされるようであるから、浸食量の測定を簡

砂のときより一段と大きい直径 15 cm 以上のものを用いた。表面水の水深が大きくなるにしたがつて、浸食面の形は一様でなくなり、とくにある水深になると水滴落下と同時に dome 状の気泡を生じ、この影響も加味され種々の形状の浸食面を形成する。これはほぼ水深によつて区別され、その概略の断面形を示すと 図-5 のようになる。

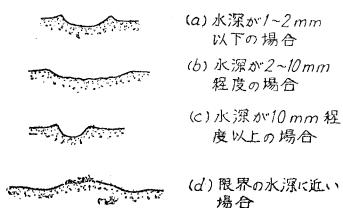


図-5 水深変化にともなう浸食面の断面の変化

Fig.5 Variation of cross-sectional shape of eroded surface with change of water depth

また 写真-1 および 写真-2 はそれぞれ砂の平均粒径 $d=0.271$ mm および 0.767 mm で、水滴径 $D=6.23$ mm および 落下高さ $H=4.38$ m の場合の浸食面形状を示したものである。なお No.1 は乾燥状態、No.2 は湿潤状態、No.3 は表面水の水深 h が 0 の場合、No.4 は $h=1.2$ mm、No.5 は $h=4.5$ mm、No.6 は $h=8.5$ mm、No.7 は $h=18.5$ mm の場合である。

水深を 0 から次第に増加させてゆくと、ある水深に至つて浸食量は 0 となり、まもなく砂の面が水滴の衝撃によつて全く攪乱されないという水深を見出すことができる。このような水深をここでは限界水深とよび、水滴の落下高さが 4.38 m および 7.1 m で、水滴径を 3.04~6.23 mm まで変化させ、6 種類の大きさの砂について限界水深に関する測

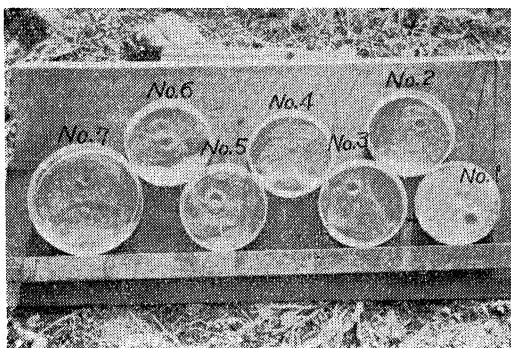


写真-1 $d=0.271$ mm, $D=6.23$ mm, $H=4.38$ m の場合の浸食面形状: No.1 乾燥状態、No.2 湿潤状態、No.3 $h=0$ mm, No.4 $h=1.2$ mm, No.5 $h=4.5$ mm, No.6 $h=8.5$ mm, No.7 $h=18.5$ mm

Photo.1 Features of eroded surfaces in the case of $d=0.271$ mm, $D=6.23$ mm and $H=4.38$ m

定を行つた。

また地下水位が浸食量に及ぼす影響を調べるために、深さ 11 cm、直径 18 cm の円筒状ガラス容器を用いて、表面から地下水位までの高さを種々変化させ、上述の方法によつて浸食量を測定した。この測定はとくに表面からの蒸発をなるべく避けるために降雨時の湿度の高いときに行つた。

3. 実験結果とその考察

(1) 乾湿土砂の場合 水滴による浸食現象は非常に複雑であるが、一種の拡散現象であつて、水滴のもつ運動エネルギーはその一部が浸食をおこすことに用いられ、他は熱エネルギーに変化するエネルギー推移の一過程である。しかし浸食をおこさしめる力を考えるならば、その力は水滴のもつ衝撃力であつて、この意味から著者らは浸食量と水滴のもつ運動量との関係を求めてみた。この水滴の運動量はその浸食力をあらわすものであるが、さらに土砂の浸食され易さあるいは耐食性をあらわすものが必要である。これは空隙率、含水比および粒径などと関係があるので、これらと浸食量との関係について吟味する必要がある。

(i) 浸食量と運動量との関係: 図-6 および 図-7 はそれぞれ乾燥した $d=0.3$ mm および $d=0.52$ mm の砂について得られた結果を示したもので、空隙率をパラメーターとしてプロットしてある。また 図-8 は大戸川流域の表土の砂質土について行つた結果である。実験の性質上かなり実験が散乱しているが、同じ空隙率については浸食量と水滴の運動量とはほぼ直線的な関係があることが見出される。また空隙率の増加とともに浸食量は増大してゆく傾向を示しているが、これについては (ii) で述べる。土についても砂の場合と全く類似した関係が見出され、乾燥状態の場合には砂と同じ程度の浸食され易さを示すことがわかる。

(ii) 浸食量と空隙率との関係: 図-9 および 図-10 はそれぞれ乾燥砂および乾燥土に対する浸食量と空隙

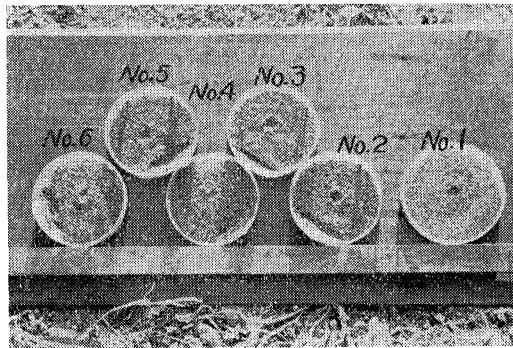


写真-2 $d=0.767$ mm, $D=6.23$ mm, $H=4.38$ m の場合の浸食面形状: No.1 乾燥状態、No.2 湿潤状態、No.3 $h=0$ mm, No.4 $h=1.2$ mm, No.5 $h=4.5$ mm, No.6 $h=8.5$ mm

Photo.2 Features of eroded surfaces in the case of $d=0.767$ mm, $D=6.23$ mm and $H=4.38$ m

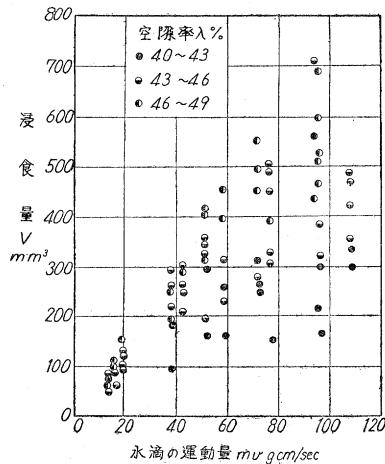


図-6 乾燥砂の場合の浸食量と水滴の運動量の関係(1), $d=0.30\text{ mm}$ の場合)

Fig.6 Relation between eroded volume of dry sand and momentum of a water-drop (1), (Case of $d=0.30\text{ mm}$)

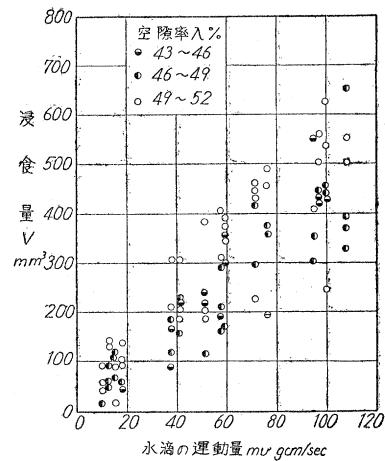


図-7 乾燥砂の場合の浸食量と水滴の運動量の関係(2), ($d=0.52\text{ mm}$ の場合)

Fig.7 Relation between eroded volume of dry sand and momentum of a water-drop (2), (Case of $d=0.52\text{ mm}$)

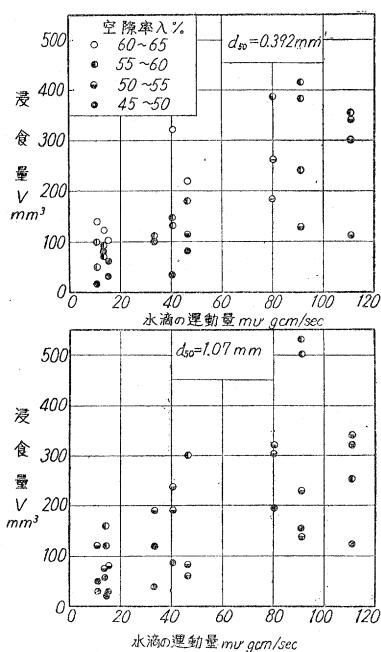


図-8 乾燥土の場合の浸食量と水滴の運動量の関係

Fig.8 Relations between eroded volume of dry sandy soils and momentum of a water-drop

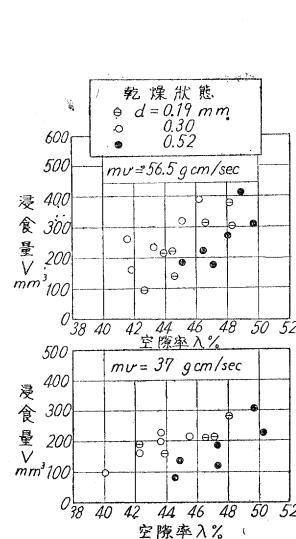


図-9 乾燥砂に対する浸食量と空隙率との関係

Fig.9 Relations between eroded volume of dry sand and its porosity

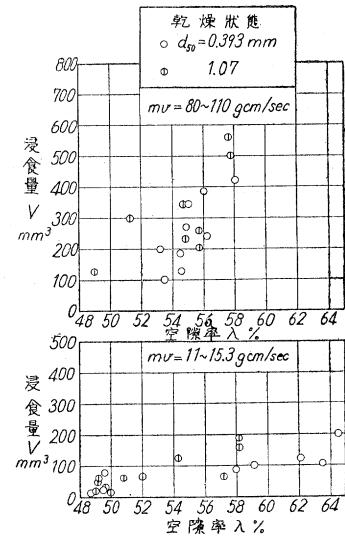


図-10 乾燥土に対する浸食量と空隙率との関係

Fig.10 Relations between eroded volume of dry sandy soil and its porosity

率との関係を示したもので、図からわかるように空隙率の効果は非常に敏感であつて、固くつきかためると浸食量は非常に小さくなり、この効果は土の場合がとくに著しい。このことは空隙率が土砂の浸食され易さあるいは耐食性をあらわす重要な要素であることを示すものである。

一方粒径の影響も同じ図から知ることができる。粒径の大きい場合の実験資料がないので、実験した粒径範囲についてしかわからないが、粒径が約1mm以下の場合には粒径の影響はあまり顕著でない。粒径が大きくなると浸食量が減少するかというとそうでもなく、土の場合 $d_{50}=0.393\text{ mm}$ のときより 1.07 mm の方が若干大きい値を示しており、極端に大きい場合は浸食量が小さくなるはずであるから、ある粒径の場合に極大の浸食量を示

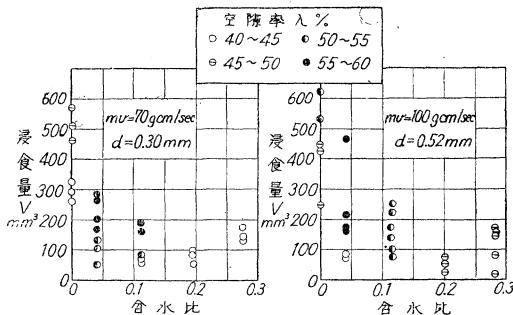


図-11 砂に対する浸食量と含水比との関係
Fig.11 Relations between eroded volume of sand and its water content

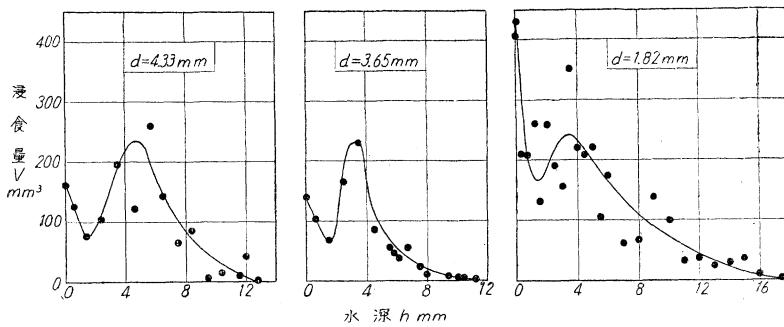


図-12 浸食量と水深との関係(1), ($D=6.23\text{ mm}$, $H=4.38\text{ m}$ の場合)
Fig.12 Relations between eroded volume of sands and water depth (1), (Case of $D=6.23\text{ mm}$ and $H=4.38\text{ m}$)

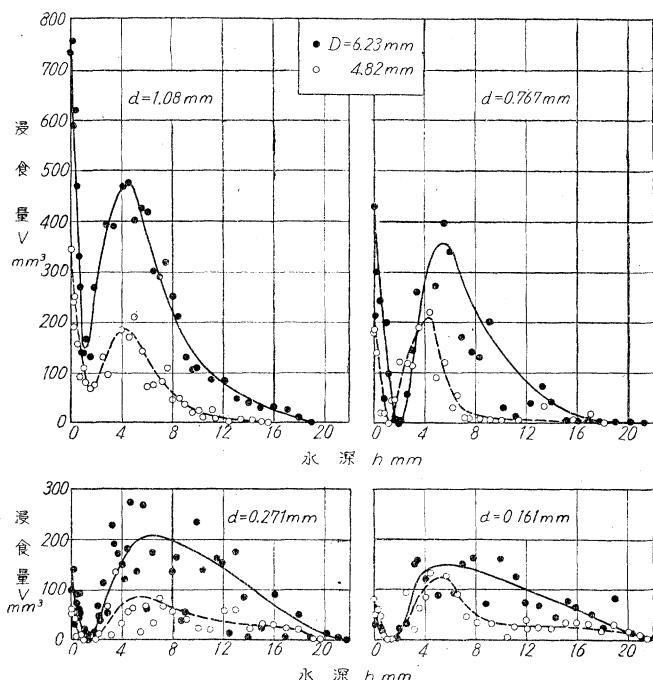


図-13 浸食量と水深との関係(2), ($H=4.38\text{ m}$ の場合)
Fig.13 Relations between eroded volume of sands and water depth (2), (Case of $H=4.38\text{ m}$)

ことになる。このような傾向は後述する表面水のある場合に非常に明白に認められた。

なお湿潤砂の場合も、つぎに述べる含水比との関係を示す図-11から、空隙率が大きくなると浸食量が増大することがわかる。

(iii) 浸食量と含水比との関係：含水比も土砂の耐食性をあらわす一要素であつて、図-11に浸食量と含水比との関係を示した。これは砂について行つた実験例であるが、この図から含水比が増加すれば浸食量が急激に減少してゆくが、ある含水比以上になると見出される。水が含まれると浸食量が急減するのは、砂粒の間に存在する水の表面張力の作用によつて、砂粒間の結合力

が生ずるためであり、また含水比がある値以上になると逆に浸食量が増大するのは、間隙に含まれる水の量が多くなり、表面張力による砂粒同志の結合力が減少するためと考えられる。とくに後者の現象は後述する地下水の影響のところで明瞭にあらわれている。

(2) 表面水のある場合

この場合の砂の耐食性をあらわす要素としては、粒径と空隙率のみを考えればよいが、ここでは空隙率の影響を除外して、つきかためない自然状態において実験した。また水滴の浸食力は表面水の水深によつて変化することは云うまでもない。

(i) 水深の変化と浸食量：図-12および図-13は水滴の落下高さ H が 4.38 m の場合の浸食量と水深との関係を示し、図-12は水滴径 D が 6.23 mm の場合、図-13は D が 6.23 mm と 4.82 mm の2種類の場合について実験した結果である。水深による浸食量の変化の模様は、粒径や水滴径が異なつても、いずれも同じ傾向を示している。すなわち、水深が 0 の場合と $3\sim6\text{ mm}$ 附近とで浸食量は最大または極大を示し、また水深が $1\sim2\text{ mm}$ 附近で浸食量は極小となり、とくに粒径が 0.767 mm 以下の場合にはこのとき浸食量は 0 となる。なお水深が $3\sim6\text{ mm}$ 附近の極大または最大点より増加すると、浸食量は次第に減少しある水深で 0 となる。このような特

性は非常に興味深い現象であつて、水滴による浸食現象の複雑さを物語る好例といえよう。とくに水深が1~2mm付近で浸食量が極小となる現象は常識的に考えられないことであつて、これはつぎに説明されるように浸食面の埋めもどし現象によるものである。すなわち、水深が0の場合には水滴の浸食力は表面水によつて何らの影響を受けず、しかも表面が攪乱される直前までは水の浮力が働くことによつて非常に大きな浸食量を示すが、水深が0からわずか増加すると水滴の浸食力の減少とともに浸食面の埋めもどし現象によつて浸食量は急減する。この現象は水滴の衝撃によつて四方へ排除された表面水が、そのとき生じた動水勾配によつて落下地点へ逆流するが、同時に砂も流动していくたん掘れた浸食面を埋めもどすものである。なお $d > 1.08 \text{ mm}$ のとき、極小の浸食量が0とならずある量を示すのは砂粒が大きくなるにつれて砂の流动がおこりにくくなるためと考えられ、またさらに水深が増加すると浸食量が急増してゆくのは、浸食面の埋めもどし現象が急速に弱くなつてゆくためであると説明される。なお図-13によつて、水滴径が小さくなれば浸食量そのものが小さくなることがわかる。

図-14は水滴径 $D = 6.23 \text{ mm}$ の場合について水滴落下高さ H による影響を示したもので、 $d = 1.08 \text{ mm}$ のときには H が小さくなるほど浸食量も減少しているが、 $d = 1.82 \text{ mm}$ のときは逆になつており、また $H = 1.66 \text{ m}$ のときは浸食量0のときの水深が他の場合よりもかなり大きくなっている。水滴の浸食力には表面水の自由表面のために、水深のほかにWeber数が関係し、水滴径や落下速度が複雑に関係してくるが、これらについては後に限界水深のところで考察する。

(ii) 浸食量と粒径との関係：浸食量は水深とともに上述のごとく変化する

が、いまその代表的な場合として水深が0のときの浸食量と粒径との関係をプロットすると、図-15のようになる。ここで参考のため水をきつた場合と地下水位の砂面から1.5cmの場合についても示した。この図から浸食量は $h=0$ の場合が最も大きく、ついで $h=-1.5 \text{ cm}$ の場合、水をきつた場合の順となつていることがわかるが、これについては地下水位の影響のところで考察する。ただ粒径が0.3mm以下になると3者の場合の浸食量にはあまり変化がなく、実験誤差のためか浸食量が上述の順になつていない場合もある。また粒径が1mm前後のときに、いずれも浸食量は最大を示している。

$h=0$ の場合には、粒径の小さいとき浸食面の埋めもどし現象によつて浸食量は小さくあらわれ、粒径が大きくなると浸食されにくくなることから上の事実が説明され、 $h=-1.5 \text{ cm}$ および水をきつた場合には、粒径が小さいときほど毛管水の表面張力による砂粒間の結合力が強いために浸食量が減少することから、同様に上述の事実が了解できるはずである。

(iii) 地下水位の影響：地下水位以上には、いわゆる毛管水が存在しており、これが前述の含水比と関連して浸食量に影響を及ぼすことは明らかである。地下水位と浸食量との関係を知ることは、排水と地表面の安定の問題に対して考慮るべき一要素であろう。図-16は水滴落下高さ $H = 4.38 \text{ m}$ 、水滴径 $D = 6.23 \text{ mm}$ 、粒径 $d = 1.08 \text{ mm}$ の場合の浸食量と地下水位との関係を示したもの

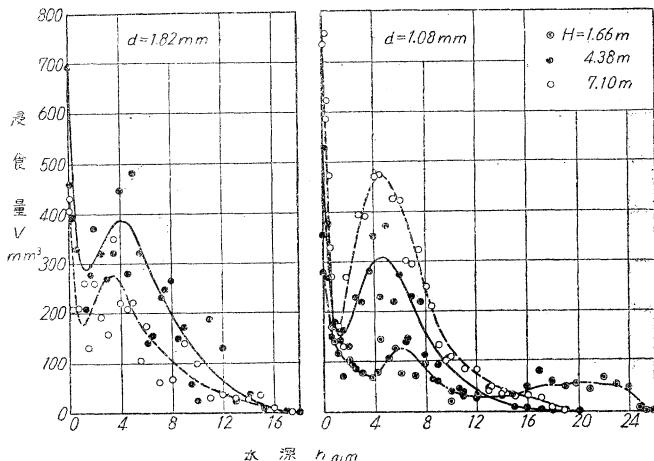


図-14 浸食量と水深との関係(3), ($D=6.23 \text{ mm}$ の場合)
Fig.14 Relations between eroded volume of sands and water depth (3), (Case of $D=6.23 \text{ mm}$)

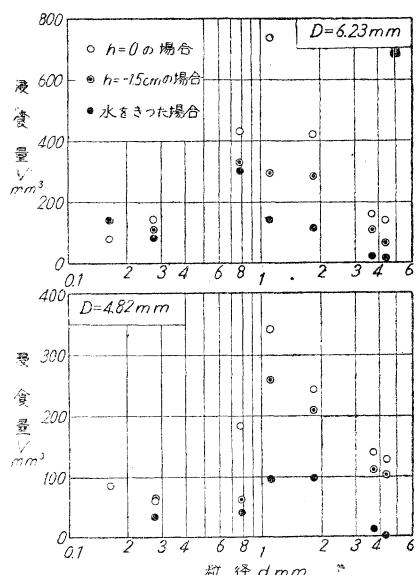


図-15 浸食量と粒径との関係 ($H=4.38 \text{ m}$ の場合)
Fig.14 Relations between eroded volume of sand and diameter of sand grain, (Case of $H=4.38 \text{ m}$)

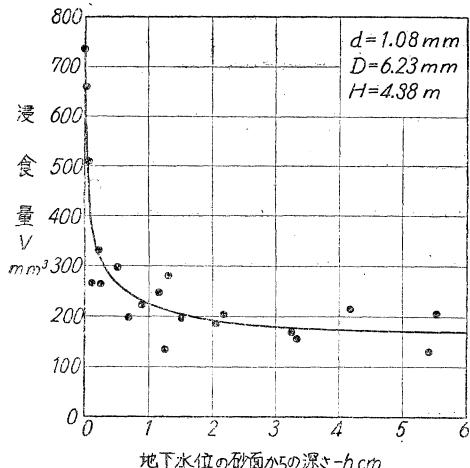


図-16 浸食量に対する地下水位の影響
Fig.15 Effect of ground water level on eroded volume of sand

いま水流の限界摩擦速度の代りに雨滴の落下速度 v をとり、 $v^2/[(\sigma/\rho)-1]gd$ なる無次元量を考える。ただし σ よび ρ はそれぞれ砂粒および水の密度である。そしてこの量が限界水深 h_{cd} と水滴径 D との h_{cd}/D の函数になるものと仮定し、両者の無次元量の関係を両対数紙にプロットしてみると図-17 のようになり、同じ水滴径および落下速度に対して

$$\frac{v^2}{[(\sigma/\rho)-1]gd} = A \left(\frac{h_{cd}}{D} \right)^8 \quad (1)$$

の関係が求められる。ただし A は無次元係数であつて、水滴が表面水の中へ入るときのエネルギー損失は水面の表面張力 T による影響が支配的であると考えるのが妥当であるから、

A を Weber 数 $W_e = \sqrt{v^2 D / (T/\rho)}$ の函数となるものとする。従つて

A と We 数とを両対数紙にプロットすれば、図-18 のようになり

$$A = 5.85 \times 10^{-28} \left(\frac{v^2 D}{T/\rho} \right)^4 \quad (2)$$

の関係が得られる。(1) および (2) 式において、 $T = 0.0742 \text{ gr/cm}$

(20°C), $\sigma/\rho = 2.6$, $g = 980 \text{ cm/sec}^2$ の値を用いると結局、

$$h_{cd} = 275 D^{1/2} d^{-1/8} v^{-3/4} \quad (\text{cm-sec 単位}) \quad (3)$$

の実験式が得られる。すなわち限界水深 h_{cd} は水滴径の $1/2$ 乗に比例

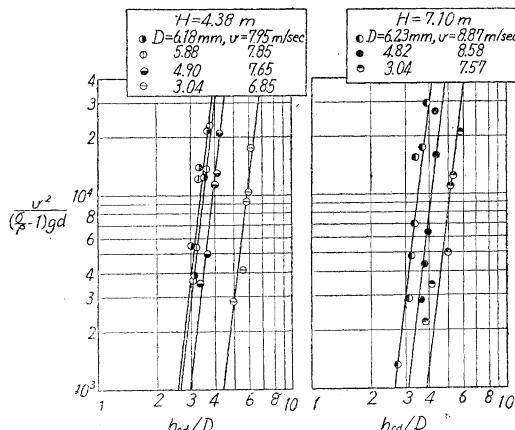


図-17 $v^2/[(\sigma/\rho)-1]gd$ と h_{cd}/D との関係
Fig.16 Relation between $v^2/[(\sigma/\rho)-1]gd$ and h_{cd}/D

のである。砂面から地下水位までの深さ $-h$ が 0 より少し増えると、浸食量は急に減少し、それから以後はあまり変化しないことがこの図からわかる。しかしさらに地下水位を低くしてゆけば、砂面付近の含水比が小さくなり、図-11 に示したように含水比が 0 に近づくにしたがつてふたたび浸食量は増大してゆくことになる。地下水位が砂面から低下してゆくと、砂粒に働く水の浮力の作用がなくなることと、毛管水の表面張力による砂粒間の結合作用が強くなることから、砂面は浸食されにくくなり、浸食量が急激に減少することになるわけである。

(iv) 限界水深：ここにいう限界水深とは、前述のように水滴の衝撃によつて砂面が攪乱されない限界の水深という意味であつて、これを h_{cd} であらわすことにする。これは雨滴の浸食力をあらわす一つの Index であつて、丁度水流による限界掃流力に対応するものといえよう。

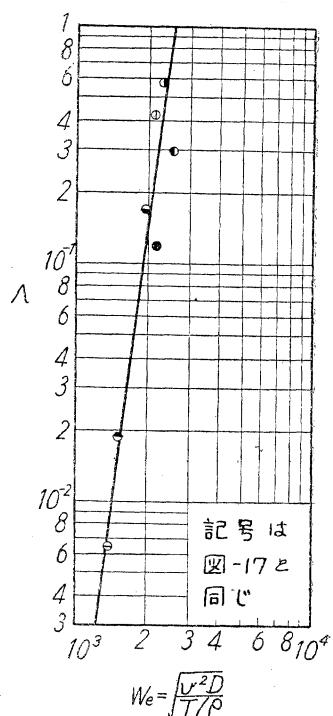


図-18 係数 A と We 数との関係
Fig.17 Relation between the coefficient A and Weber Number

し、粒径の $1/8$ 乗および落下速度の $3/4$ 乗に逆比例することになる。ここで常識的に考えると h_{cd} は v が大きくなれば大きくなるように思われるが、これは反対であつて大きさが同じ水滴ならば落下高さの低いほど h_{cd} が大きくなる。このことは図-14において、 $H=1.66\text{ m}$ の場合の浸食量が0となる水深が H が大きい他の場合に較べて大きくなっている現象を説明することができ、定量的にも(3)式で計算して得られる h_{cd} の値とよく一致する。

4. 雨滴浸食と地面の保全に対する考察

上述の水滴による地面浸食に関して明らかにされた結果をもとに、地面の保全について考察を加えてみたい。

雨滴浸食を防ぐには、雨滴の浸食力を減殺すること、地面を浸食されにくくすることである。雨滴の運動量が大きいと、地面に表面水がない場合は雨滴の攪乱作用が激しいから、雨滴の浸食力を減殺するため降雨をさえぎることが有効である。しかし高い樹木によつてさえぎると、雨滴は大きい水滴となつて地面に落下し、この水滴の運動量は雨滴の運動量よりさらに大きくなつて逆効果になるとも考えられ、このことから降雨のシヤ断はなるべく地面に接近させて行う必要がある。中崎氏¹⁰⁾は降雨の際に土が荒されるのは樹木の下の方が甚だしく、また果樹園における土壤浸食の大なることに気つくと述べ、乾燥砂について著者らと同様な実験を試みている。また地面の耐食性を増すためには、つきかためなどによつて空隙率ができるだけ小さくし、かつ降雨時に適度の含水比をもつようになることが必要である。一方地面に表面水がある場合、とくにその水深が0附近では雨滴による攪乱力は非常に激しく、土砂の剝離現象が著しくおこつて地面は甚しく破壊される。雨量強度が滲透能をこえ、雨水の流下が始まる初期においては、この激しい剝離現象によつて多くの土砂が運ばれることが予想される。Ellison¹¹⁾の人工降雨による土砂の飛散および土砂流出の実験結果は、如実にこの事実を示している。このことから土砂道の路面などで最も好ましいのは、地面の滲透能をより大きくすることであつて、雨水流によつて土砂を流出せしめないという点からも最良の処理法であろう。

5. 結論

雨滴による地面浸食の機構はかなり複雑である。雨滴の地面上落時の運動が非定常でかつ瞬間的であるため、その機構を力学的に解析することができず、どうしても実験によつて雨滴の浸食力と地面の耐食性に及ぼす各種の要素との関係を明らかにし、その実験事実にもとづいて現象を解析してゆくより方法がない。著者らはこの立場に立つて一滴の水滴による主として砂面に対する浸食機構の解明に努めた。しかしこの現象を各種の場合に対して定量的に解明することは非常に重要なことであつて、将来広汎な実験計画のもとに詳細な実験を行い、雨滴による地面浸食機構の全貌を明らかにしたいと考えている。

以上明らかにされた事項を要約すればつぎのようになる。

- (1) 乾燥土砂に対する水滴による浸食量は水滴のもつ運動量の増加とともに、ほぼ直線的に増大する。
- (2) 乾燥土および乾湿砂とも空隙率が増加すれば浸食量は増大し、空隙率の影響はかなり敏感である。
- (3) 砂についての含水比の影響は、含水比を0から増してゆくと浸食量は急激に減少するが、さらに増加してゆくとかえつて浸食量が増加はじめ、ある含水比で極小があらわれる。その理由は毛管水の表面張力による砂粒間の結合作用によつて説明できる。
- (4) 表面水のある場合は、水深の増加にともなつて浸食量は特異な変化の模様を示し、浸食量の極大および極小があらわれる。この現象は水滴の浸食力の表面水による減少、水の浮力の効果および浸食面の埋めもどし現象によつて説明される。
- (5) 表面水の水深が0の場合に浸食量は最大または極大を示し、かつこの量は粒径によつて変化し、粒径が1mm附近で最大となる。この現象もやはり埋めもどし現象、浮力の効果および粒径の増大による耐食性の増大によつて説明される。
- (6) 地下水位が砂面から低下してゆくと、浸食量は急減するが、やがてその変化は緩慢になる。これは浮力の効果と毛管水の表面張力効果から説明される。
- (7) 水滴によつて砂面が攪乱されなくなる限界の水深に対する実験式が作られた。
- (8) 実験結果にもとづいて雨滴浸食と地面の保全に対する若干の考察を行い、実際問題に対して注目すべき示唆を与えることができた。

最後にこの研究を行うに当つて終始御指導を賜つた石原教授ならびに、実験の一部を手伝つていただいた豊田章三君に深甚の謝意を表する次第である。なおこの実験は文部省科学研究費による研究の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) W.D. Ellison : Studies of Raindrop Erosion, Agri. Eng. Vol. 25, April and May, 1944, pp. 131-136, pp.181-182.
- 2) W.D. Ellison : Two Devices for Measuring Soil Erosion, Agri. Eng., Vol. 25, Feb., 1944, p.53.
- 3) W.D. Ellison : Soil Erosion Studies-Part I, Agri. Eng., Vol. 28, April, 1947, pp.145-146.
- 4) W.D. Ellison : Some Effects of Raindrops and surface-Flow on Soil Erosion and Infiltration, Trans. Amer. Geophy. Union, Vol. 26, No. 3, Dec., 1945, pp.415-429.
- 5) T.M. McCalla : Water-Drop Method of Determining Stability of Soil Structure, Soil Science, Vol. 58, 1944, pp.117-121.
- 6) W. Hitschfeld : Free Fall of Drops through Air, Trans. Amer. Geophy. Union, Vol. 32, No. 5, Oct., 1951, pp.697-700.
- 7) P. Lenard : Über Regen, Met. Zs., Vol. 21, 1904, s. 248-262.
- 8) W. Schmidt : Eine unmittelbare Bestimmung der Fallgeschwindigkeit von Regentropfen, Sitz Ber. Wiener Akad. Wiss., Vol. 118, No. 2 a, 1909, s. 71-84.
- 9) J.O. Laws : Measurement of the Fall-Velocity of Water-Drops and Raindrops, Trans. Amer. Geophy. Union, Part III, 1941, pp.709-721.
- 10) 中崎昭人 : 水滴による土壤面破壊について, 農業土木研究, 第13巻, 第3号, 昭.25, pp.148-151.

(昭.30.12.19)

昭和31年6月25日印刷	土木学会論文集	定価 120 円 (税込 20 円)
昭和31年6月31日発行	第 35 号	
編集兼発行者 東京都千代田区大手町2丁目4番地	中川一美	
印 刷 者 東京都港区赤坂溜池5番地	大沼正吉	
印 刷 所 東京都港区赤坂溜池5番地	株式会社 技報堂	
東京中央郵便局区内 千代田区大手町2丁目4番地		
発行所 社団法人 土木学会	電話 (20) 3945・4078	振替 東京 16828