

雨滴の終末速度による地面浸食に関する研究 (3)

藤原 輝男* 金山 和雄*

Studies on the Mechanism of Soil Erosion by Raindrops (3)

Teruo FUJIWARA and Kazuo KANAYAMA

Abstract

In this paper, we analyzed a mechanism of soil erosion by raindrops.

Recent experimental studies have shown that in addition to the soil moved downslope by flowing surface water, some soil is carried downslope by the splash from raindrops.

When falling raindrops strike either the soil surface or a thin film of water covering the surface, soil and water particle are splashed into the air. If the raindrops fall vertically to the surface of a hillside they tend to strike glancing blows and the splashed soil is mostly thrown down hill.

Another cause for the splash moving soil toward the base of the hill is that the particles moving downslope travel greater horizontal distances than those directed upslope.

1. まえがき

雨量、雨量強度、降雨継続時間などの水文学的な問題とその治水への応用に関しては、現在までかなりの研究がなされてきており、まだ十分とは言えないまでもその研究の進展が見られる。

しかし雨に関しては、雨滴が地面に落ちるときの仕事によって土壌粒子を分散し、それが土壌流亡に影響を及ぼすというもう一つの作用がある。最近の土木の開発事業の急拡大による都市近郊の土地造成による土壌浸食問題は耕地拡張に伴う土壌浸食の問題とならんで、その土壌浸食防止が問題化している。

土壌浸食防止に関してはすでにアメリカでは W. D. Ellison, Zing, Nichols, Johnston らによって研究が行なわれ、その防止策についてのかかなりの成果が収められつつある。

我国は降雨量も大きく、傾斜度も大きいため一般に土壌浸食防止の問題はより切実であるが、降雨および地形の特殊性により、我国でアメリカの防止法そのままを採用することは難しく、我国独自の防止策を解明する必要がある。

* 土木工学科

過去の研究の初期の段階においては、土壌流亡は地表水の掃流力のみによって分散され搬送されるものとするのが一般であったがその後の研究によれば、雨滴の打撃力により土壌粒子が分散され、それによって微粒子が土壌表面の空隙を埋めて浸透を阻み、その結果増大する表面水による運搬作用が土壌浸食を増大せしめる原動力となっていることが想定されている。

このように雨滴の衝撃力が浸食に対してかなりの作用のあることは1940年以前にも Horton, Duley などによって述べられている。本論文は、主に雨滴エネルギーによる土壌浸食に関する基礎的研究を行なったものでとくに表面水のある場合について実験が行なわれた。

もちろん本研究は表題の問題に関するごく足掛りの範囲に過ぎず、今後さらに種々の原理的、実際的研究の累積によってのみ問題の解明が期待されるものである。

なお本研究は終末速度をもつ雨滴による実験に終始した所にその特色がある。

2. 実験装置および実験方法

2.1 終末速度

上空において水蒸気粒子は重合を重ね、その重さが

浮力以上になると落下し始め、次第に加速度を増してゆくが、雨滴の空気抵抗と釣り合う時点で一定速度となって以後その一定速度を維持する。この時の速度を終末速度というが、普通、直径5mm程度の雨滴では10m程度で終末速度に達するといわれることから、半無限の上空から落下する自然降雨の際の雨滴は当然終末速度をもつ。なお、雨滴の落下実験においては直径1mmまでは正しい球として落下するがそれ以上では正しい球状を維持し得ないことが確認されており、径が大きい雨滴ほど変形が大で空気の抵抗が大きいことが実測により示されている。この直径の決定およびその直径の雨滴の落下速度は単に速度としてはそれ程重要でないが、その雨滴のもつ運動エネルギーを考える場合には速度の2乗として影響してくるので、その決定の意義は必ずしも小さくはない。しかし、本実験では雨滴の変形過程については触れずに、たとえば雨滴径は同じ体積の球体のもつ直径をもって代えられている。

2.2 実験装置

普通、自然における雨滴径はほぼ6mm程度以下であり、その程度の雨滴であればほぼ10m程度の落下距離があれば、その落下速度はほぼ終末速度に達すると考えられる。このため、本実験においては工学部キャンパス内の給水用鉄塔に長さ24m、内径20cmの塩ビ管を鉛直に取り付けてこれを用いた。実験に際しては、水滴の落下瞬間のわずかの振れによって地上ではかなりの落下地点のずれを生じ、径22cmのシャーレに充

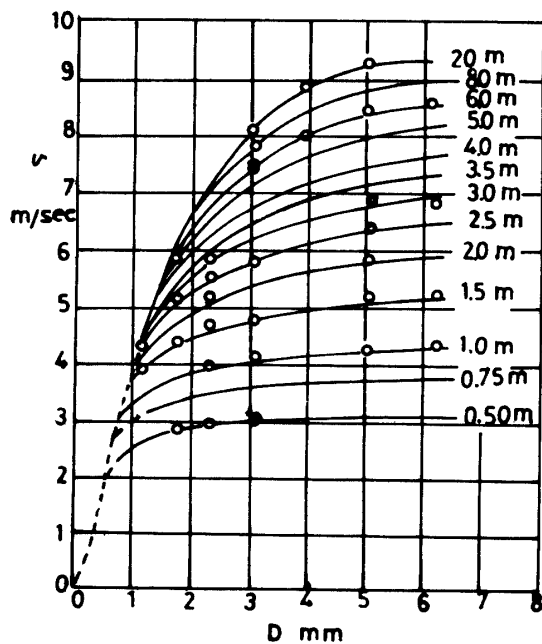


Fig.1 Relationship between falling velocity and raindrops diameter

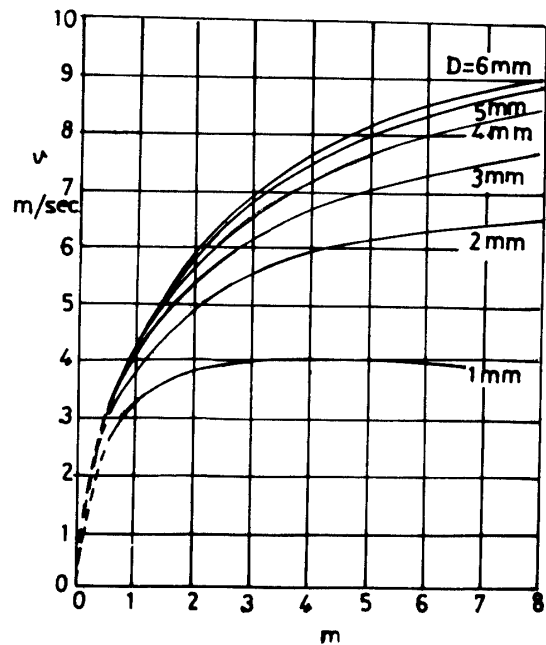


Fig.2 Relationship between a falling velocity and raindrops diameter

填した試料の上に落下しないこともあるため、落下瞬間の水滴を風の影響から守るため管の上部をふさぎ、地上には実験小屋を建て、小屋の天井を突き破って管を小屋内に入れ、隙間を塞いで実験を行なった。

なお、終末速度は水滴の直径から Laws の実験結果に基づく Fig. 1, Fig. 2 より読み取った。

2.2.1 雨滴発生装置

雨滴の発生には医療用の点滴装置の先端にガラス管を取り付け、コックにより水滴を一定の時間間隔で落下できるようにセットすることにより、一種類の実験を終えるまでは同じ条件で雨滴を連続的に落下させ、実験を一時中断する場合には落下してくる水滴を他の容器に受け、試料の上へ落下しないようにした。なお点滴装置は管の最上端より60cm程下方の側壁に開閉可能な窓を設け、セットしたあと窓を閉じて実験を行なった。

2.2.2 雨滴径の決定

点滴装置より落下する水滴40滴を容器に受け、その重量から、水滴を球と見なした時の1滴の径を求めたが、実際にはこの操作を4回行なって求めた平均値を用いた。その結果3種類のガラス管の内径の差によって、それぞれ5,619mm, 5,033mm, 4,308mmの径の水滴を得た。

2.2.3 砂試料

実験に用いた砂は、篩分けにより次の6種類の均一砂で、径22cmのシャーレに充填し、大きい容器の台の上に置き、砂面上に表面水のある場合の実験には補助タンクを取り付けて、これを上下させることにより水位の昇降を調節した。直径0.178mm, 0.335mm, 1.015mm, 1.125mm, 1.545mm, 1.840mm 6種類の砂を用いた。

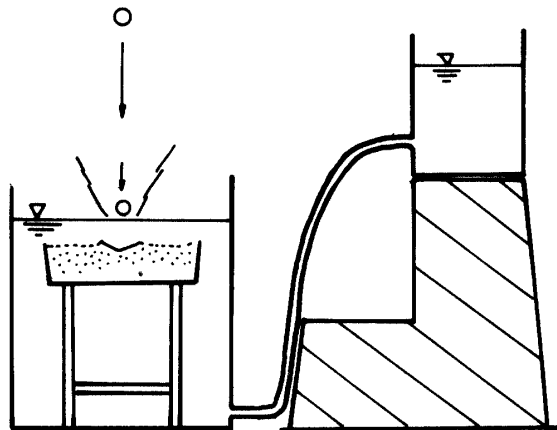


Fig.3 Experimental equipment

2.3 実験方法

2.3.1 実験の概要

内径約25cmの容器内で所要の表面水深を保っている試料砂上に、塩ビ管内を終末速度 v_t をもって落下してきた水滴を受ける。水滴は $\frac{1}{2}mv_t^2$ のエネルギーをもって表面水に衝突し、その衝撃力は水深が小さい間は砂面にまでおよび砂面をへこませ、横方向に押すと共に飛沫を生じて砂粒子を飛散させる。衝突後、静水になるのを待って補助タンクを下げ静かに水を抜き砂面を露出させると砂の表面にはくぼみが出来ている。落下前の砂面からのくぼみの体積が浸食量であり、この形を $\frac{1}{20}$ mm読みのポイントゲージによって測定し、雨滴による浸食量として求めた。

もちろん、このくぼみの体積を占めていた砂は一部は圧縮されて空隙を埋めた分もあるし、横に押されて盛り上った分もあるし、あるいは飛散した分もあると思われるが、それらの定量的把握、それらの分量の割合、そのメカニズムなどについては不明である。

2.3.2 浸食量

浸食面はおおよそFig.4のような断面形状をとるが、同じ条件の場合でも必ずしも同じでなく、種々の形態、ディメンジョンを呈し、その浸食量がいくらかを決定

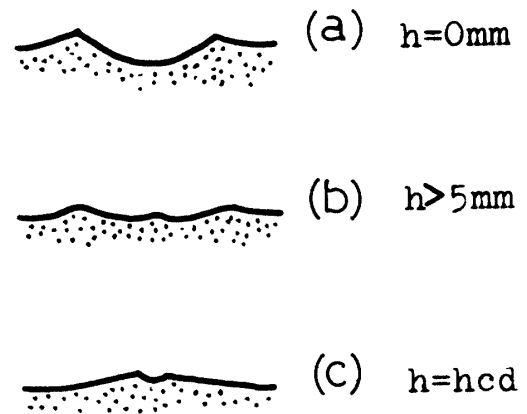


Fig.4 Soil erosion profile

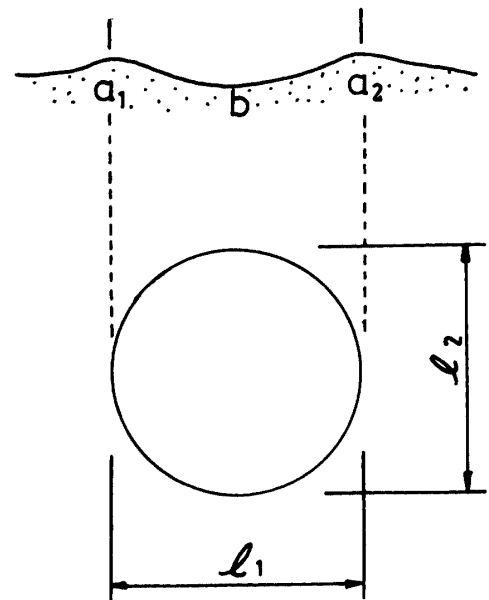


Fig.5 Definition sketch of symbols

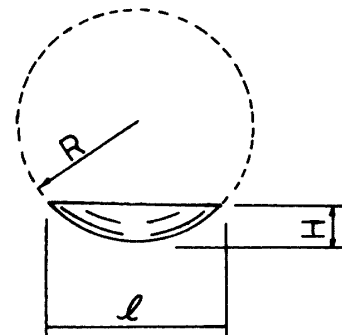


Fig.6 Definition sketch of symbols

する際には困難を生じたが、多くの予備的考察と測定

および算定の簡便さをも考慮して球体の一部と仮定することが適当と思われたので Fig. 5 に示すように、浸食面断面における両端の最高部 a_1, a_2 および中間の最低部 b の高さを測定して浸食深さ $H = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) - b$ を求めると同時に l_1, l_2 の平均値としての l を求めて、式(1)の計算式により浸食量 V を求めた。

$$V = \frac{\pi H^2}{3} (3R - H) \quad (1)$$

ここに R は球体の直径として、 $R = \frac{1}{8}(4H + \frac{l^2}{H})$ で求められるが l^2 には $l_1 \cdot l_2$ の値を用いた。

この際、浸食深さ H は原砂面から b 点までの高さの差と考えるべきであるが、 l の測定の際に便宜上 a_1 と a_2 との距離を測ることとしたので H についても a と b の標高の差をもって代え、全実験についてこれをもって終始した。

なお、前述のごとく、この種の実験については同一条件下でも浸食量の測定値にかなりのバラツキが見られ、したがって浸食量の決定には同一条件で最大20滴の実験を行ない、その平均値をもって浸食量と決定した。また砂の粒径、表面水深その他の実験の条件が異なると浸食形状自体についても種々の変化を生じるが、これらもすべて球体の一部という仮定で計算した。

3. 実験結果

3.1 現象の概要

実験は乾燥砂をシャーレにできるだけ静かに充填し、そのあと表面を水中で水平にならし、いわゆる突き固めない状態に統一して行なった。このため浸食現象での要素としての耐食性については考慮せず、主に水滴のもつ衝撃力の変化について、とくに砂面上に表面水深のある場合について実験を行なった。

前述のように表面水深 $h = 0\text{mm}$ 、すなわち地下水位が丁度表面まである状態の時には大抵の場合、浸食形状は Fig. 4 のごとく球面の一部と見てよいが、 $h > 5\text{mm}$ のように砂面上かなりの水深があると雨滴のエネルギーは表面水により消費され砂面に及ぼす力は徐々に減少し、したがって浸食面形状も極めて不鮮明となり、ついには測定不可能なほど浸食量が0に近づく。この浸食量が0になるときの表面水深を限界表面水深 h_{cd} と呼ぶが、これは雨滴径および砂の粒径などにより異なる。

なお浸食形状の測定に際しては粒子が細かい砂の場合に比べ、粒径の粗い砂では粒子間隔が大きいために

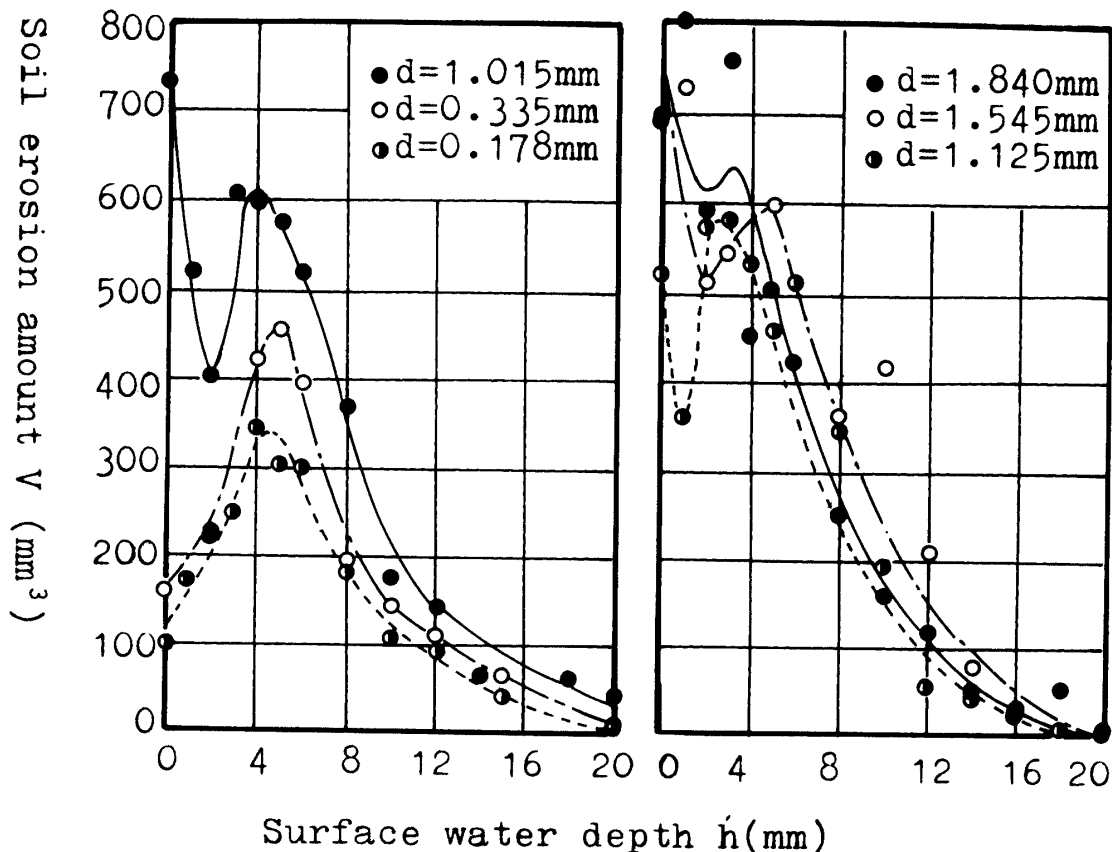


Fig.7 Relationship between soil erosion amount and surface water depth

鮮明さを欠き、ポイントゲージによる測定もとくに困難であった。

3.2 表面水深の変化と浸食量

Fig.7は直径 $D=5.619\text{mm}$ の水滴が高さ 24m の地点より落下し終末速度にて試料上に衝突する場合、その砂面上に表面水深 h があつた場合の h の変化に対する浸食量 V の変化の関係を示したもので、砂の粒径については6種類を用いた。

表面水深による浸食量の変化は砂粒径 $d=1\text{mm}$ 以上のものに関してほぼ同じ傾向を示し、 $h=0$ でかなり大きな浸食量を示し、 $h=4\text{mm}$ 前後で極大値、 $h=1\sim 2\text{mm}$ 付近で極小値をもつパターンを示し、砂粒径が、 $d=0.5\text{mm}$ 程度以下の小さいものでは $h=0\text{mm}$ でもそれほど大きい値を与えず、 $h=4\text{mm}$ 前後で極大値をもつ単純な山型のパターンを示す。また、いずれも $h=20\text{mm}$ 付近ではほぼ浸食量は0に近づく。

このFig.7のように2つの極値をもつことは、岩垣⁽¹⁾らによつてもすでに示されているが、単純な常識では理解が難しく、岩垣らもこのような特性は非常に興味深い現象であるとして「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り、これは水深が0の場合には水の浮力も働いて浸食量大であるが、水深が0からわずかに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時生じた動水コウ配によつて落下地点へ逆流するが、同時に砂も流動していったん掘れた浸食面を埋め戻すのである。」と説明している。なお「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戻し現象が急速に弱くなってゆくためである。」としている。

著者もまた、この埋め戻し現象に興味をもち種々観察を重ねた結果、その現象の存在は認めるが、それが動水コウ配によるものだと説明には十分な納得が得られず、そのメカニズム究明のため高速カメラ(16ミリ、500コマ/秒)による写真判定を試みたが、このことについては別紙にて触れる。

3.3 砂粒径の変化と浸食量

Fig.8, Fig.9は砂の粒径を変えた場合、浸食量がどのように変化するかという面から整理した実験結果であるが、 $h=0$ における浸食量に関しては砂粒径 d が

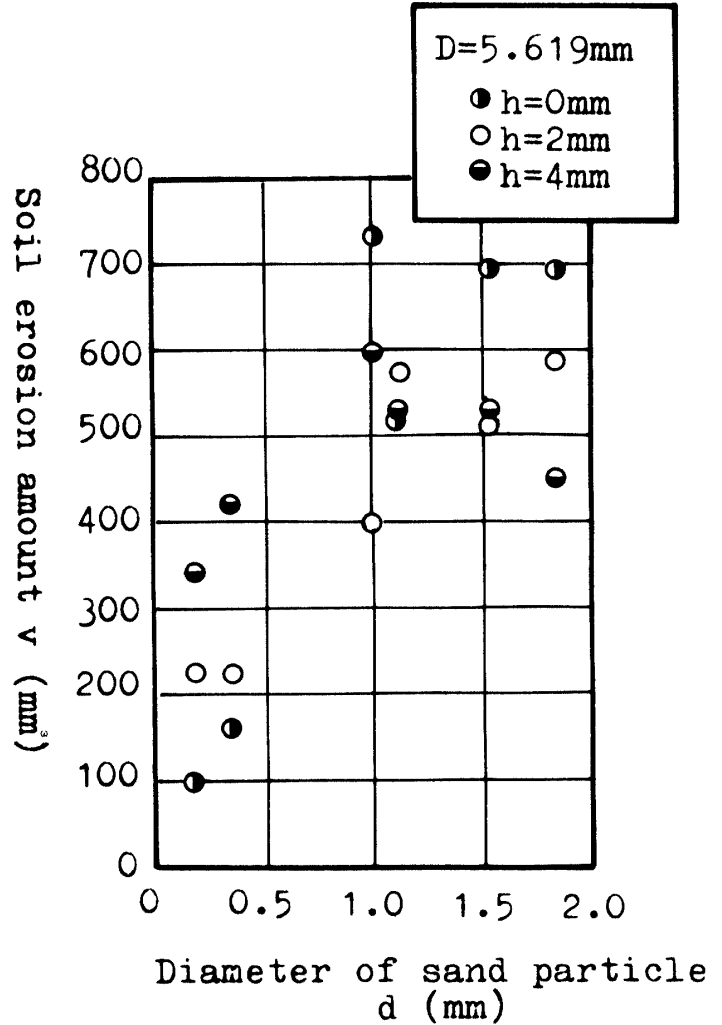


Fig.8 Relationship between soil erosion amount and diameter of sand particle

小さい時、かなり小さい浸食量の値を示す。 $h=0$ ということは砂表面まで水で飽和されている状態であるが、砂の粒径が小さい程、水の表面張力による砂粒子間の結合力が強いので小さい浸食量を示す。

Fig.9は雨滴径を3種類用いたときの比較的浸食量が大きく、またその特徴もよく表わしている水深 $h=6\text{mm}$ と $h=8\text{mm}$ の場合について示したもので、 $d=1\text{mm}$ 付近でピークの値を示している。このことはFig.8についても同じ傾向を示しているが、このことは結局 d が小さい砂では表面張力の影響で流動が起こりにくく、 d が大きい砂ではそれ自体の重量により流動が起こりにくく、両者の影響力の弱まる粒径 1mm 付近で浸食量のピークを示すものと考えられる。なおFig.9においてピークを示している $d=1.015\text{mm}$ のすぐ近くの粒径 $d=1.125\text{mm}$ では、全体の傾向からみて、不連続的にやや浸食量が小さくなっているが、これはこの砂の粒径範囲が $0.840\sim 1.410\text{mm}$ で他の砂の倍近くの粒径範囲をとっているため混合がよく、空隙がつま

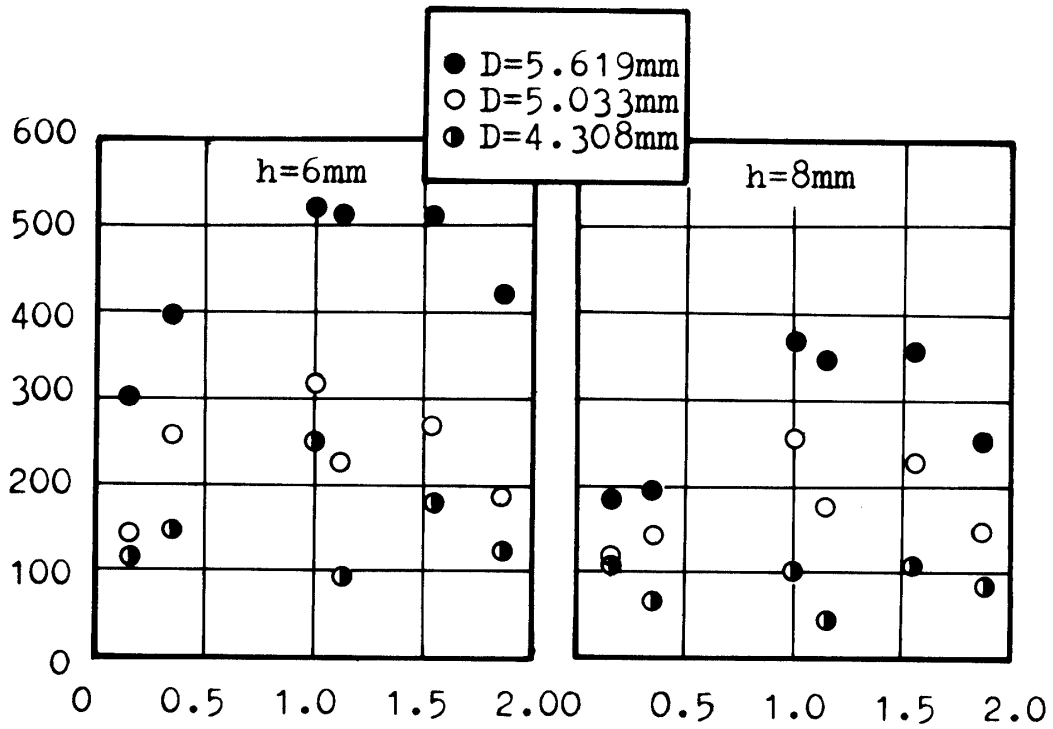


Fig.9 Relationship between soil erosion amount and diameter of sand particle

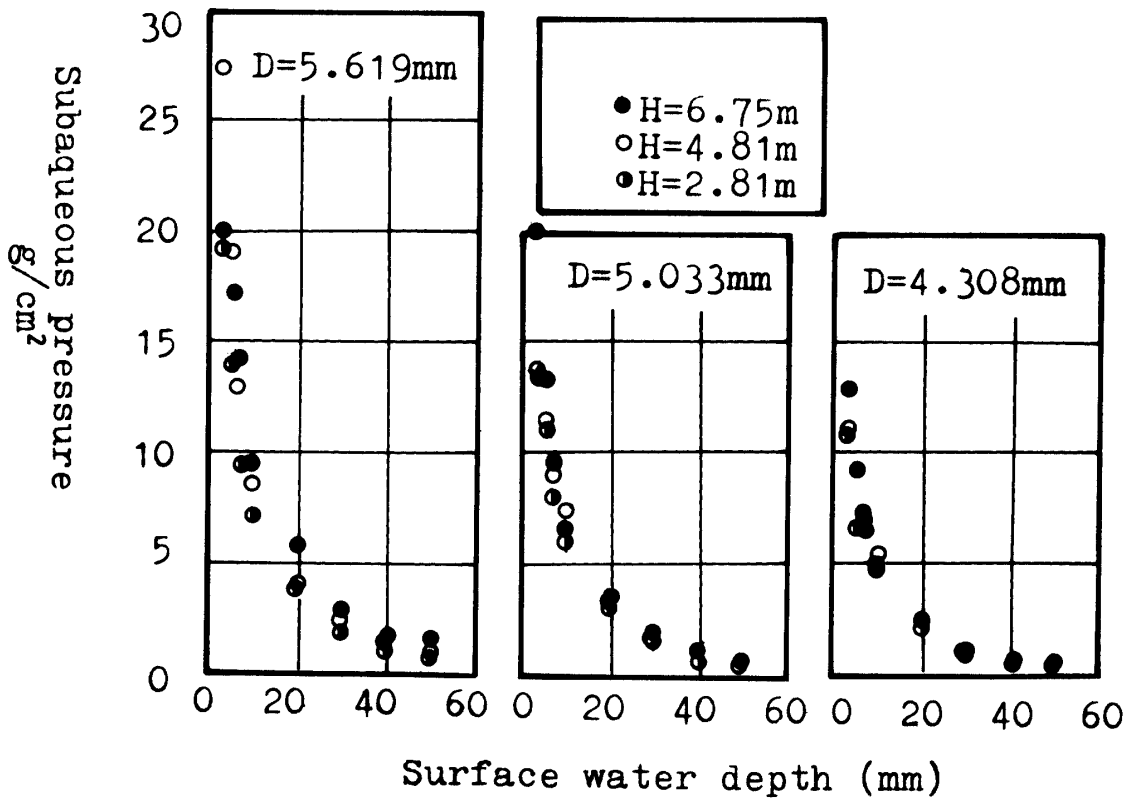


Fig.10 Relationship between surface water depth and impact pressure of raindrop at the water bottom

り耐食性が増大していたためではなかったかと思われる。

このように砂の浸食を考える場合、粒子間の空隙が大きい場合と、空隙に小さい砂粒子が詰まって空隙を塞いでいる場合とでは水滴による衝撃力の砂層内部への伝わり方が異なり浸食量に影響を及ぼすものと考えられる。

3.4 表面水深と水底圧力

表面水深 h と浸食量 V との関係が Fig.7 のように $h = 1\text{mm}$ 付近で極小、 $h = 4\text{mm}$ 付近で極大値をもつことについて、1つには雨滴による衝撃力は水深が 1mm 程度の時に水面のもつ表面張力その他の水の物理性により反発され、砂面まで衝撃力のほとんどが伝わらないため、また $h = 4\text{mm}$ 程度の時には丁度最大に伝わる

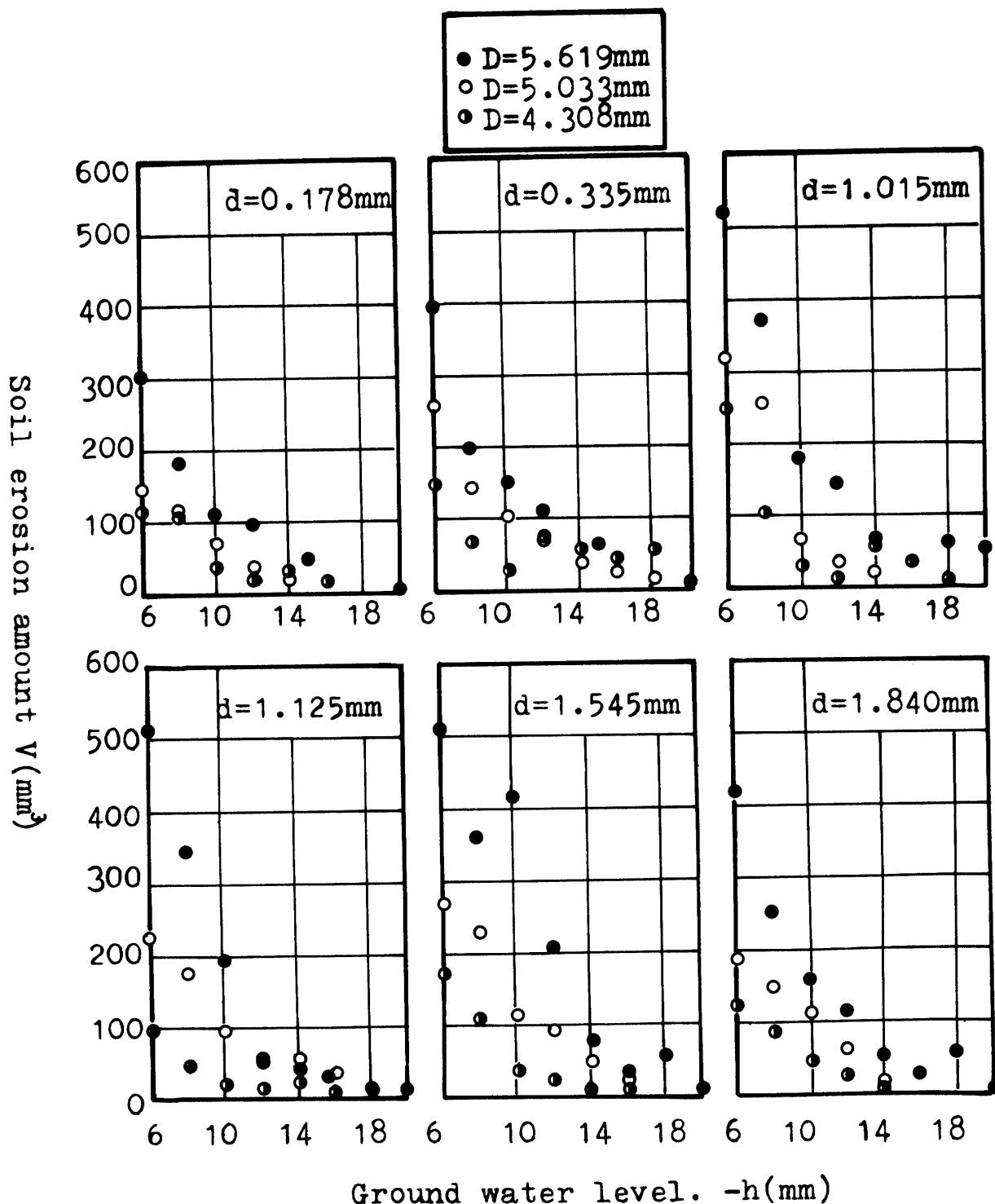


Fig.11 Relationship between soil erosion amount and ground water level

ためではなかろうかとの疑念を晴らすため、容器の中央に圧力計を設置し、雨滴径を3種類、落下高さを3種類変え、圧力計受感部上種々の水深についてストレーンメータに記録させて、表面水のある場合の底面への圧力伝達について実験を試みた。

この結果は水表面に加わる衝撃力は水深の増加に伴って単純に減少し、極大、極小値を与えない特性を示した。したがって浸食量の極大、極小値は水中における砂の性質か、あるいは水滴が水面へ衝突した瞬間に生じるドーム状の気泡などの二次的な水の運動かによるものであり、水滴の衝撃力の伝わり方自体によるものではないことが判明した。

3.5 砂粒径と限界表面水深

3.5.1 限界表面水深の決定

限界表面水深を決定するには、ごくわずかしき砂表面が乱されていない状態から全然乱されていない状態へ移る微妙な状態の観察によりその時の限界表面水深を決定しなければならないため観測者によりかなりの個人誤差を含み、主観の入る要素が多い。とくに砂粒径が粗い場合には砂表面のわずかな凹凸はそれが最初からのものか、雨滴による浸食によるものなのか判断が困難である。しかるに表面水深の変化に対する浸食量の変化に注目し、とくに表面水深 6mm 以上の場合

についてみると Fig.11 のようになり、ほぼ指数曲線になることから、この指数曲線を片対数紙にプロットし、浸食量 10mm³ になるときの水深をもって限界表面水深と定義して、以下この値を用いた。

3.5.2 砂の粒径と限界表面水深

Fig. 11 からわかる様に水深 6mm 以上では浸食量と水深との関係は指数関数に近似できる。このことを利用して浸食量 $V(\text{mm}^3)$ を

$$V = a \cdot e^{-bh} \quad (\text{mm}^3) \quad (2)$$

h : 表面水深 mm a, b : const

という式で表わし、この式における浸食量が 10mm³ となる水深を限界表面水深 $h_{cd}(\text{mm})$ とすることにした。したがって限界表面水深 h_{cd} は

$$h_{cd} = \frac{1}{b} \log\left(\frac{a}{10}\right) \quad (\text{mm}) \quad (3)$$

となる。

なお、浸食量が 10mm³ となる水深を限界表面水深と決定した理由は、(2)式の性質上、有限水深では浸食量は 0 にはなり得ないからであり、また我々が実際にできる限り厳密に測定した限界表面水深から判断して 10mm³ が適当と思われたからである。したがって水深 6mm 以上における浸食量 V は次式のようなになる。

$$V = a \cdot e^{-bh} - 10 \quad (\text{mm}^3) \quad (4)$$

なお、実験から得られた定数 a および b を示すと、Table.1 のようになる。

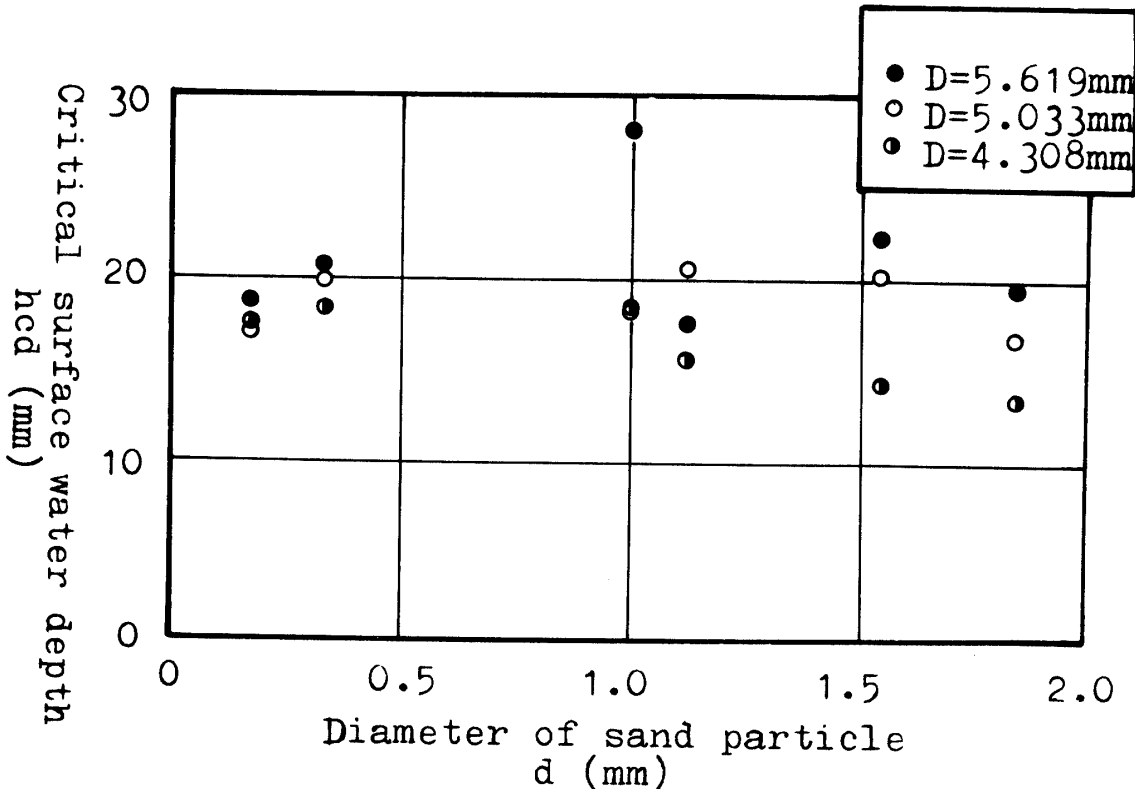


Fig.12 Relationship between critical surface water depth and diameter of sand particle

Table. 1

d mm	$D=5.619\text{mm}$		$D=5.033\text{mm}$		$D=4.308\text{mm}$	
	a	b	a	b	a	b
0.178	1957	0.28	823	0.26	397	0.21
0.335	1787	0.25	968	0.23	470	0.21
1.015	1192	0.17	1544	0.28	476	0.21
1.125	5577	0.36	916	0.22	251	0.21
1.545	3344	0.26	1266	0.24	1576	0.36
1.840	2438	0.28	1503	0.30	1626	0.38

Table. 2

d mm	限界表面水深 h_{cd} mm		
	$D=5.619\text{mm}$	$D=5.033\text{mm}$	$D=4.308\text{mm}$
0.178	18.84	16.96	17.53
0.335	20.74	19.88	18.33
1.015	28.12	18.00	18.39
1.125	17.57	20.53	15.35
1.545	22.36	20.17	14.06
1.840	19.63	16.71	13.40

Table. 1 において特に目立った傾向は見出せないが、 b の値は、ほぼ0.2~0.3である。

Table. 1 の数値を(3)式に代入することにより得られた限界表面水深 h_{cd} を Table.2 に示す。

ここで水滴径をパラメータとして限界表面水深と粒径の関係をプロットするとFig.12のようになる。

これから、限界表面水深と粒径の関係も傾向として

は、浸食量と粒径の関係と全く同じであることがわかる。

3.6 地下水位と浸食量

水滴径 $D=5.619\text{mm}$ 、砂粒径 $d=0.178\text{mm}$, 0.335mm , 1.015mm の3種類について水位を砂表面より下

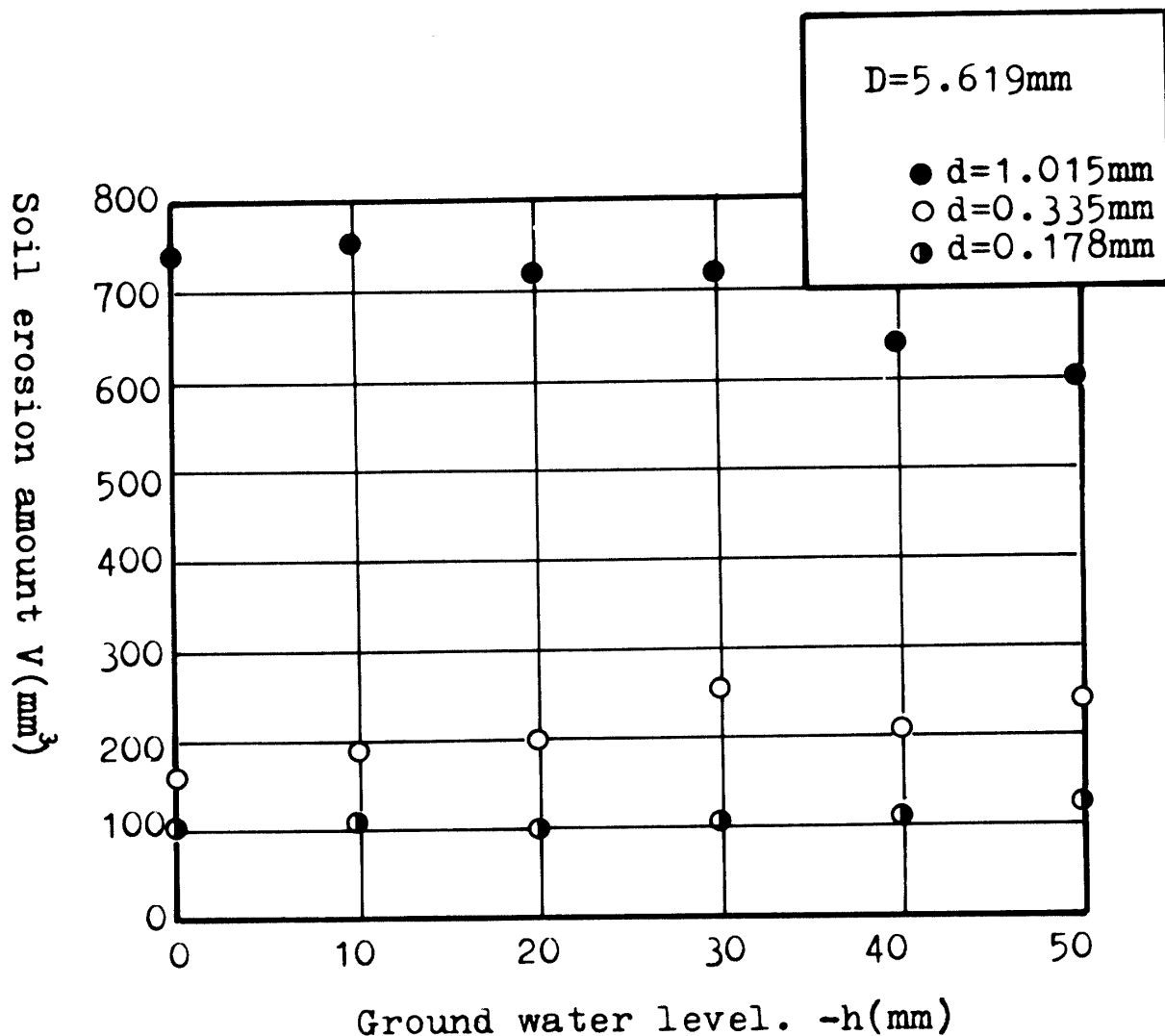


Fig.13 Relationship between soil erosion amount and ground water level.

げたときの浸食量に関する実験結果が Fig. 13 である。わずかに3種類の粒径に対する実験結果であるが各粒径の特徴をよく表わしている。つまり、 $d=1.015\text{mm}$ の砂は表面張力の影響をあまり受けないので水位が表面水から地下水に変わったことによる条件の変化は、砂粒が水による浮力を受けなくなったことが大きいと思われる。したがって、地下水位の砂面からの深さが増すほど浸食量は小さくなっている。一方、粒径の小さな $d=0.325\text{mm}$, 0.178mm では水位変化がすぐには起こりにくいこともあり、水位が表面水から地下水に変わったことによる条件の変化は、浮力の影響よりも表面張力の減少による影響が大きいと考えられ、地下水位の深さの増加に伴って浸食量は増加している。 $d=0.178\text{mm}$ の方が $d=0.335\text{mm}$ に比べて増加の割合が小さいのは、粒径が小さくて水位の変化しにくい $d=0.178\text{mm}$ の砂の方が表面張力の変化も小さいためであると考えられる。

4. 結 論

水雨による土壌面浸食の機構は水滴の土壌面落下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は非常に困難で、その実験事実に基づいて現象を解析してゆくより方法がない。この見地に立ち、実験を行なった結果明らかにされた事項

を要約すれば次のようになる。

a) 表面水を持つ土壌面における浸食量は、表面水深をパラメータとすれば、浸食量と表面水深のグラフにおいて極大、極小を有する特異な形状を示す。

b) 土壌面の浸食量に影響を及ぼすものは表面水深のみならず土壌に含まれる砂粒径によっても変化する。すなわち、平均粒径 1mm 付近で浸食量は最大となる。但し、平均砂粒径が 1mm 前後であっても、粒径範囲が広がると、粒度組成の関係で逆に浸食量が小さくなる。

c) 本来、土壌と表面水の兼ね合いで起こる現象を、表面水だけに注目し、その水深による圧力の影響を調べたが、予想を越えた結果は得られず、水深の増加に伴って、圧力は減少していった。しかし、この結果は、現象の説明が表面水と土壌を切り離しては論じることが出来ないことを示すと共に、表面水による力の減衰を考える上で有益であった。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・土屋義人：「水滴による地面浸食に関する二、三の実験」土木学会論文集 35, 55 (1956)
- 2) 三原義秋：「雨滴と土壌浸食」農業技術研究所報告A第1号, July. 1951

(昭和52年4月15日受理)