

# 落下水滴衝撃による 土壌面の圧力変動と土粒子挙動の写真解析

藤原輝男\*・深田三夫\*・松崎浩憲\*\*

## Pressure Fluctuation at the Soil Surface and Photographic Analysis of Behavior of Soil Particles by the Impact of a Falling Waterdrop

Teruo FUJIWARA, Mitsuo FUKADA and Hironori MATSUZAKI

### Abstract

A raindrop of natural rain falls with terminal velocity at the soil surface. In the laboratory, however, it is difficult to simulate actual rainfall, so experiments must be conducted with waterdrops which do not reach terminal velocity.

This paper shows how the effect of drop size and impact velocity on the maximum pressure at the soil surface was experimentally investigated. The results of the experiments indicated that dimensionless parameters made by drop size, impact velocity and impact pressure were closely related to each other. It seems possible therefore to change the pressure force of the impact of a waterdrop which has fallen from a comparatively low height for that of the impact of a raindrop.

In order to reveal the mechanism of soil erosion, the effects of a fallen waterdrop on soil particles and surface water were recorded using high-speed camera (16mm) and single-lens reflex camera (35mm). The photoanalysis helped explain the phenomenon of a fallen waterdrop digging a hole which is then filled by the splashed soil particles.

### 1. まえがき

降雨によって生じる土壌侵食現象には、雨滴の衝撃力による土壌破壊作用と、土壌表面を流れる雨水の掃流力による輸送作用とがある。本研究は、前者の雨滴衝撃力を加味した土壌侵食量についての関係を求めるための基礎となる研究である。普通雨滴は10m程度の落下距離で、重力による加速度と空気抵抗とがバラ

スをとって一定の落下速度（終末速度）になることがわかっており、自然降雨は半無限大の高所より落下するため、地表面付近では当然、終末速度をもって落下している。しかるに室内実験の場合、普通十分な落下高さを持つことが困難で、低所より終末速度に達しない落下速度での実験を余儀なくさせることが多い。このため室内で行う実験の場合の落下水滴の衝撃力が自然降雨の場合であればどのような雨滴に相当するものであるかについて衝撃力の変換が必要である。本研究では、水中への落下水滴による衝撃力、およびガラスビーズの層をもつ湛水深のある場合の雨滴衝撃力の変化に関する実験結果を無次元化し、それをを用いて室内

\* 土木工学科

\*\* 大学院土木工学専攻

における模擬降雨による衝撃力から自然降雨による衝撃力に変換することを試みた。

さらに、落水水滴の水中における挙動を知ることで、土壌侵食のメカニズムを解明するため、高速カメラを用いて写真解析を行った。先に岩垣ら<sup>9)</sup>は雨滴による土壌面の侵食量の実験において、湛水深のある場合には埋めもどし現象があるのではないかと推定のもとに実験結果を説明しているが、本研究では、この写真解析によりその埋めもどしの現象の有無を確かめるとともに、盛り上がり砂の挙動や、その他落水水滴による土壌面の土粒子の一連の動きを解明することを目的とした。

2. 実験装置および方法

2.1 圧力測定実験

2.1.1 圧力測定装置

Fig. 1のように水槽底面の中央に圧力変換器を取り付け、これを動歪測定器とペンレコーダに連結する。落水水滴が一定点に落下するよう水面上部に水滴通過孔を設け、これを通過した水滴だけが径4mmの圧力変換器受感部に落下するようにした。

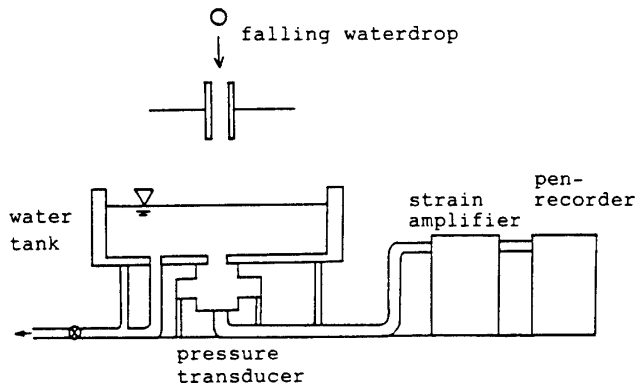


Fig. 1 Schematic diagram of pressure measuring apparatus

2.1.2 実験方法

Fig. 1に示す圧力変換器の取り付けである水槽底面を地表面とみなし、その上部に水深を与えた場合と、さらに底面上部にガラスビーズを敷き水深を与えた場合について実験を行い、それぞれの場合について落下高 (H)、水滴径 (D)、水深 (h) を変化させその組み合わせで実験を行った。

また、圧力測定実験では完全な終末速度を得られるような高所による水滴落下が不可能であったため、終

末速度に近い速度の得られる、12mの高さの鉄塔からの落水水滴をもって終末速度を持つ落水水滴とした。

2.1.3 実験の種類

Table 1およびTable 2に実験データを示す。

(a) ガラスビーズのない場合

Table 1 Experimental conditions (1)

falling height H(m)	12	5.7	2.8	1.5
diameter of waterdrop D (mm)	5.61	5.61	5.57	5.57
	5.10	5.28	5.28	5.05
	4.18	5.05	5.10	4.18
	3.39	4.58	5.05	3.39
		4.30	4.58	2.75
		3.46	4.18	
			3.39	
			2.75	

(b) ガラスビーズのある場合

Table 2 Experimental conditions (2)

diameter of glass beads (mm)	5.2		3.2	
falling height H(m)	12	1.5	12	1.5
diameter of waterdrop D (mm)	5.61	5.57	5.61	5.57
	5.05	5.05	5.05	5.05
	4.30	4.18	4.18	4.18
		3.39		3.39
		2.75		2.75
thickness of layer of glass heads (mm)	7.7	5.8	4.8	6.6
	10.2	13.1	7.5	7.5
	11.3	29.5	12.3	18.5
	13.5		13.1	
	18.8		15.3	
	22.0		24.7	26.6

2.1.4 ペンレコーダーのデータ値

水滴発生装置から通過孔を通過して落下した水滴は、圧力変換器の受感部に衝突し、その衝撃力の値が動圧と静圧の和としてペンレコーダーのデータシートに記録される。すなわち、圧力Pは

$$p = p_0 + p' = \rho_w g (h_0 + h') \quad (1)$$

$\rho_w$  : 単位体積重量

$g$  : 重力加速度

$h_0$  : 湛水深

$h'$  : 水滴衝撃力による等価水深

で表される。圧力変換器はあらかじめ静水圧で検定しておきレコーダーの読みより逆に圧力を推算する。

記録紙上の水深 $h=0$ の点を基準として、水滴が衝突していない場合の水深 $h_{ave}$ と水滴が衝突した時の最大値 $h_{max}$ を読み取り、 $h_{max} - h_{ave}$ なる値が衝撃力に相当する値となる。

2.2 写真解析実験

2.2.1 一眼レフカメラによる写真撮影装置

Fig. 2は落下水滴による表面水の挙動をカメラにより撮影するための装置である。雨滴衝撃力実験に用いた水滴発生装置より水滴を落下させ、被写体上部の径15mmの水滴通過孔を通過した水滴だけが、その真下に設置されている赤外線センサーに反応し、それが現象を撮影するカメラに連動されるようにした。そして赤外線センサーの反応からカメラがシャッターを切るまでの遅れ時間を勘案し、落下水滴が、水槽内の表面水に衝突した瞬間が撮影できるようにした。

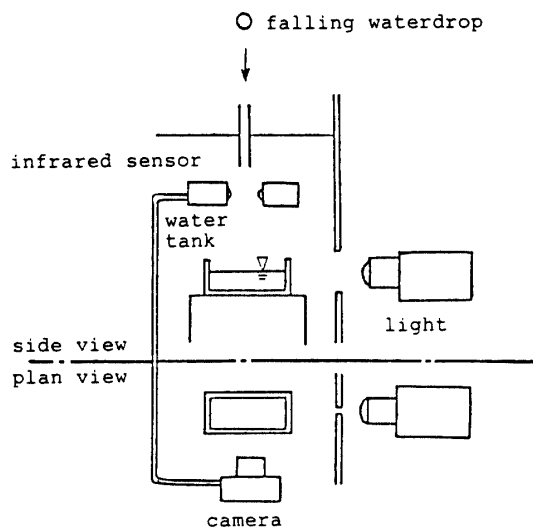


Fig. 2 Schematic diagram of photographic apparatus by the single-lens reflex camera (35mm)

撮影は暗室で行い、スライドプロジェクター (1050 W) を光源とするスリット光を照明として用い、水槽内の水滴の落下する点を含む断面だけが照らされフィルムに感光するようにした。

2.2.2 高速カメラによる撮影装置

Fig. 3は実験室内において、水滴発生装置より水滴を水槽内へ落下させこれを高速カメラにより撮影する装置である。光源にはレフランプ (500W) を使用し、これと被写体との間にすりガラスを置き後方からの透過光による照明とした。なお、この装置を用いて一眼レフカメラによる写真撮影も行っている。

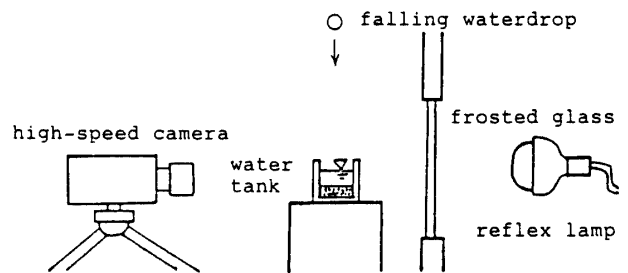


Fig. 3 Schematic diagram of photographic apparatus using a high-speed camera (16mm)

2.2.3 実験条件

(a) 一眼レフカメラによる写真撮影実験

土粒子が無い場合の落下水滴の水中の挙動、それに水深を変化させたときの水中の挙動の変化を知るためにFig. 2の装置を用い、次のような条件により撮影を行った。

落下高:  $H = 5.7\text{m}$

水深径:  $D = 5.6\text{mm}$

水深:  $h = 30\text{mm}$

:  $h = 20\text{mm}$

:  $h = 15\text{mm}$

:  $h = 10\text{mm}$

:  $h = 5\text{mm}$

(b) 高速カメラによる撮影

湛水深がある場合の落下水滴による土粒子の挙動を知るためにFig. 3の装置を用い、次のような条件で撮影を行った。

落下高:  $H = 5.7\text{m}$

水滴径:  $D = 5.6\text{mm}$

水深:  $h = 3\text{mm}, 10\text{mm}$

土粒子: ポリ球 (径 $0.5\text{mm}$ ) を使用、厚さ $5\text{mm}$ 程度に敷いてある。

3. 実験結果と考察

3.1 圧力測定実験

3.1.1 解析方法

流体粘性や砂粒径の影響を無視すると、落水水滴による土壌破壊には、次の6個の物理量が関係する。

- P : 底面圧力
- h : 湛水深
- V : 落下速度
- D : 水滴径
- $\rho_w$  : 水の単位体積重量
- g : 重力加速度

この6個の物理量の間関係式は

$$p = f(h, v, D, \rho_w, g) \tag{2}$$

次元解析により圧力pの無次元関数形は次のようになる。

$$\frac{p}{(1/2)\rho_w v_0^2} = f\left(\frac{h}{D}, \frac{v_0}{\sqrt{gD}}\right) \tag{3}$$

なお、(3)式は  $p = \rho_w g (h_{max} - h_{ave})$  を代入して  $\rho_w g (h_{max} - h_{ave}) / (1/2)\rho_w v_0^2$  とした。

3.1.2 解析結果

(a) 湛水深のみの場合

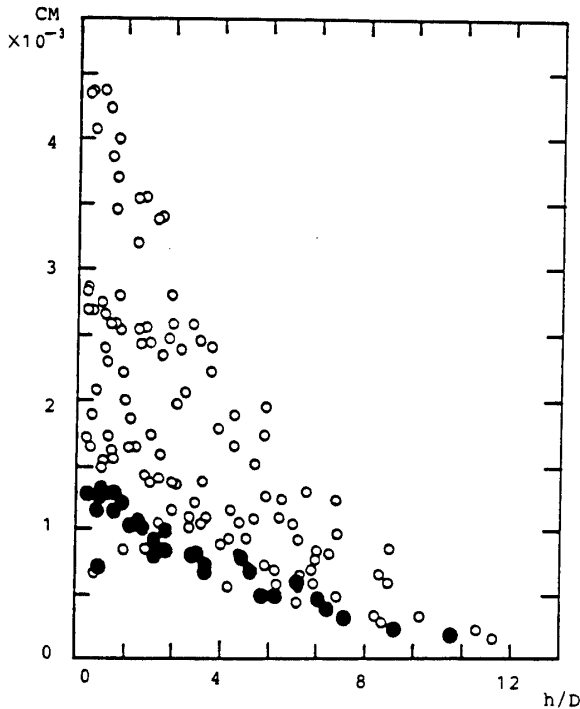


Fig. 4 Relationship between CM and dimensionless water depth h/D with only surface water (1)

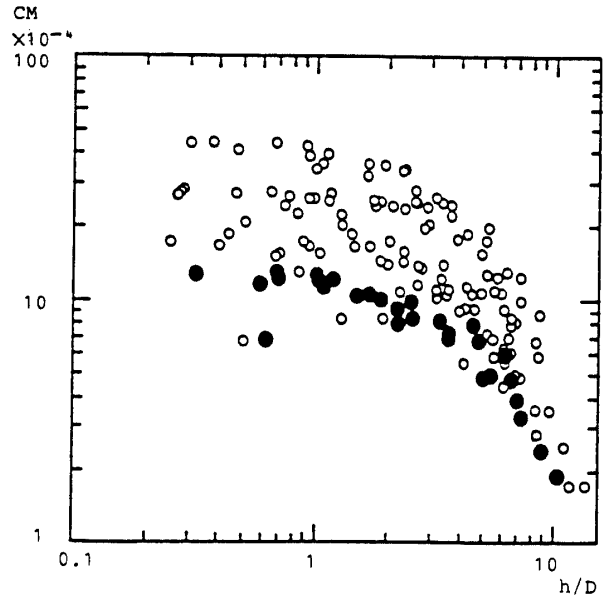


Fig. 5 Relationship between CM and dimensionless water depth h/D with only surface water (2)

Fig. 4およびFig. 5は2.1.3の実験条件により得たデータを(3)式の2個の無次元量

$$CM = \frac{\rho_w g (h_{max} - h_{ave})}{(1/2)\rho_w v_0^2}, \frac{h}{D}$$

についてのをまとめ、縦軸をCM、横軸をh/Dとしてプ

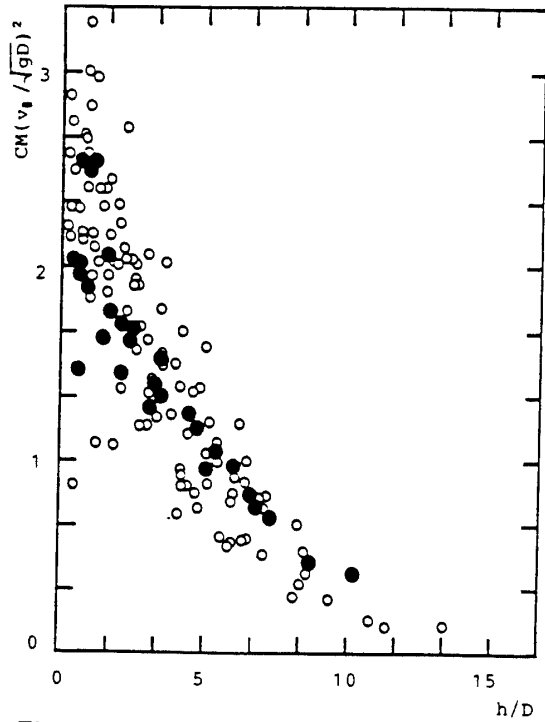


Fig. 6 Relationship between  $CM (v_0/\sqrt{gD})^2$  and dimensionless water depth h/D with only surface water (1)

ロットしたものである。Fig. 4は普通グラフ、Fig. 5は両対数グラフであるが、両者とも12mの落下高さを持つ終末速度によるものと、落下高さを十分にとれない室内実験によるものとの間に明確な一致が見られなかった。このことから、速度 $v_0$ を含むもう一つの無次元量  $(v_0/\sqrt{gD})^2$  が関係してくるのではないかと考えられた。

いま、 $(v_0/\sqrt{gD})^2$ をCMに乗じて $CM(v_0/\sqrt{gD})^2$ 、 $h/D$ をそれぞれ縦軸、横軸にとり普通グラフにまとめるとFig. 6のようになる。これFig. 4に比較してかなり一致した傾向が表れている。これをさらに一致させるため、両対数グラフにまとめたものがFig. 7である。これより、 $CM(v_0/\sqrt{gD})^2$ と $h/D$ の対数は線形関係にあることがわかる。

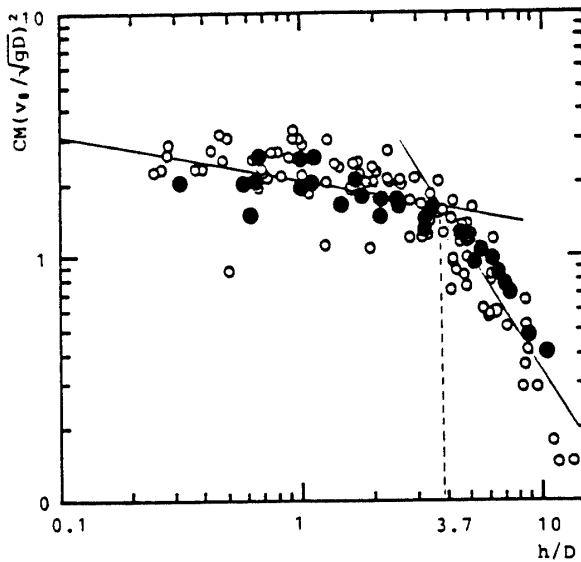


Fig. 7 Relationship between  $CM(v_0/\sqrt{gD})^2$  and dimensionless water depth  $h/D$  with only surface water (2)

Fig. 7では、 $h/D=3.7$ の点から傾向が変化している。これを $h/D \leq 3.7$ と $h/D > 3.7$ の部分に分けて近似で表すと次のようになる。

$h/D \leq 3.7$ のとき

$$CM(v_0/\sqrt{gD})^2 = 2.08(h/D)^{-0.186}$$

$h/D > 3.7$ のとき

$$CM(v_0/\sqrt{gD})^2 = 13.88(h/D)^{-1.612}$$

以上より、CMは他の2つの無次元量のべきで表されるものと思われる。

(b) 底層にビーズを置いた場合

Fig. 8およびFig. 9は2.1.4より得たデータを(a)と同様の無次元量についてまとめたものである。

(i) Fig. 8はビーズ球の大きさによる影響を調べる

ものである。球径5.2mm、3.2mmの2種類についてしか比較していないが、この2種類のデータに関しては一致している。このグラフは比較的圧力の影響の大きいと思われる層厚が10mm以下のデータによるものである。

(ii) Fig. 9は層厚による影響を調べたもので、このグラフは層厚の薄い部分では3.1.2の層厚の無い場合のFig. 7の傾向に類似しているが、一致するものではない。さらに層厚が大きくなるにつれてグラフにはばらつきが生じてくる。

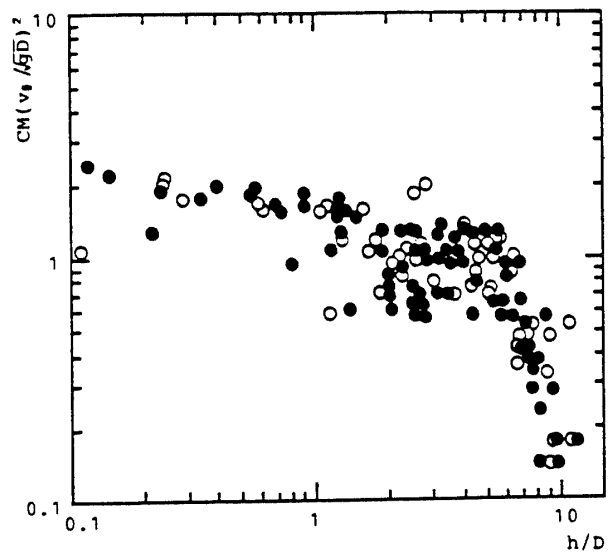


Fig. 8 Relationship between  $CM(v_0/\sqrt{gD})^2$  and dimensionless water depth  $h/D$  with glass beads and surface water (1)

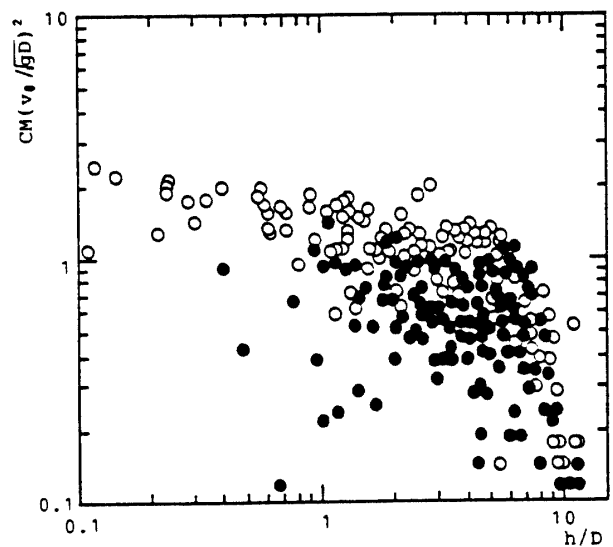


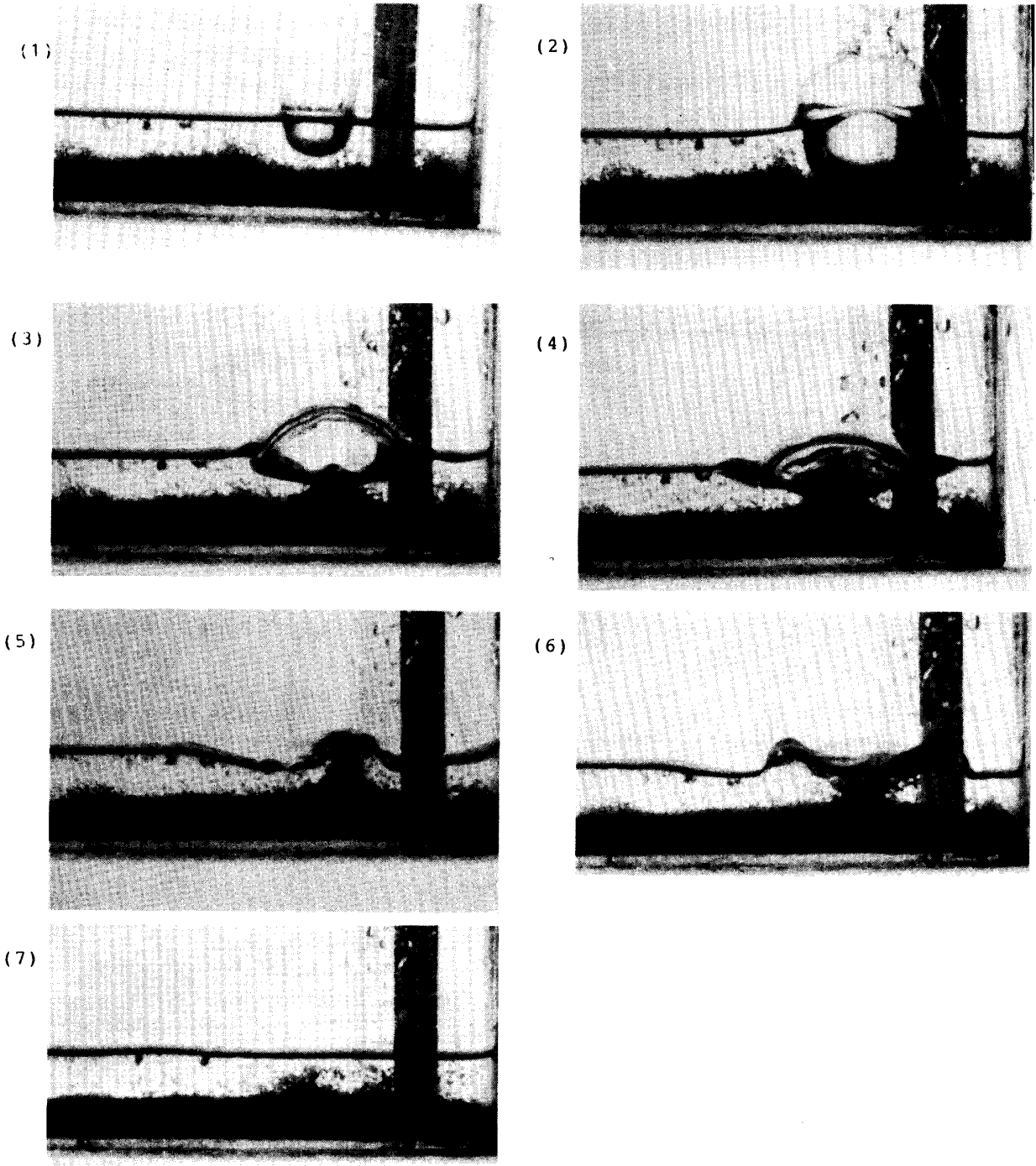
Fig. 9 Relationship between  $CM(v_0/\sqrt{gD})^2$  and dimensionless water depth  $h/D$  with glass beads and surface water (2)

3.2 写真解析実験

3.2.1 高速カメラによる撮影結果解析

Photo. 1(a),(b)の(1)~(10)は2.2.2の方法による撮影で得たものである。このデータを基に落下水滴による水

中での挙動を解析していく。いま, Fig. 10, Fig. 11 に落下水滴の運動のメカニズムを時間的に追った模式図を示し, その状況を次に述べる。



(a) water depth  $h=10\text{mm}$

Photo. 1 Some photographs taken by the high-speed camera

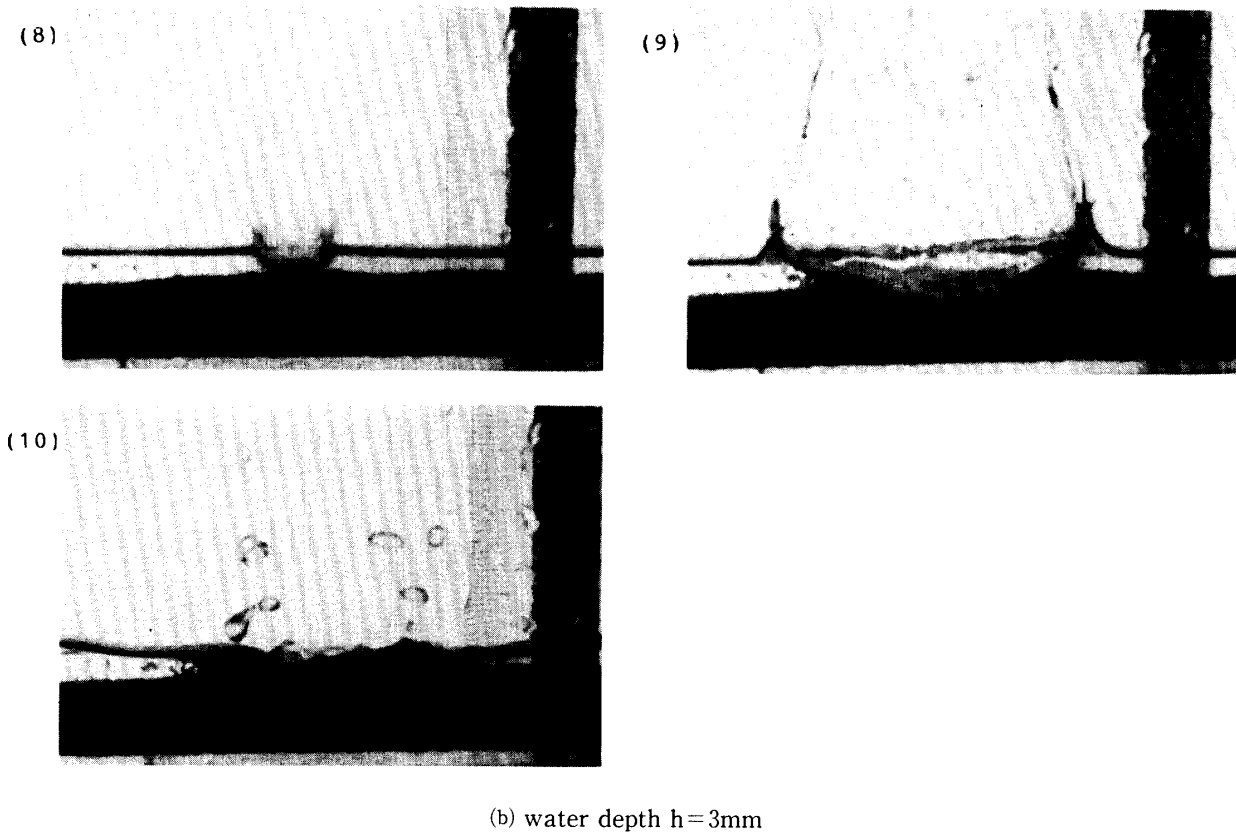
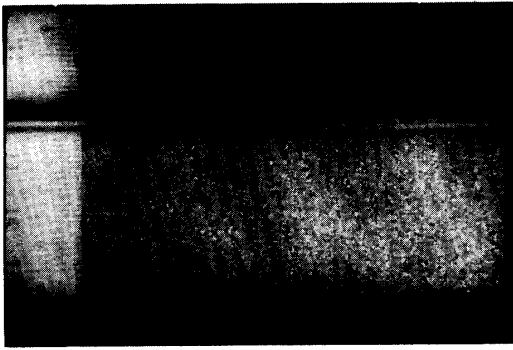


Photo. 1 Some photographs taken by the high-speed camera

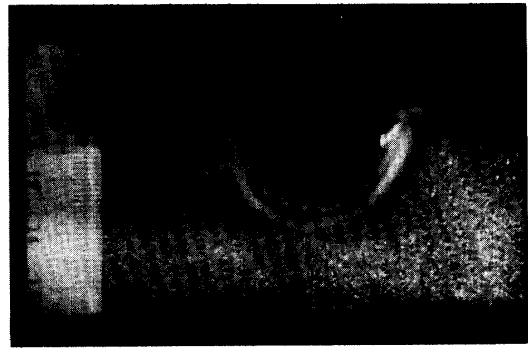
(a) 湛水深 $h=10\text{mm}$ の場合

- ① 落下水滴が水面に衝突すると、その時点で水滴が所有していたエネルギーは、水面を放射状に押し退けようとするエネルギーに変換されるものと思われ、これによって水中には半球状の空気球が形成される。このとき、押し退けられた表面水は水中に流れを起し、水の一部は水面上に飛び出して行く。
- ② 水中の空気球は次第に大きくなっていくが、この空気球形成の過程でもたられる水の流れは、ポリ球を押し退ける働きをし侵食を促す作用をするものと考えられる。また、水面上に飛び出した水の飛び出し角度は、空気球が大きくなるにつれて大きくなり、最終的にこれらの上端部は水面上で集結し、これによって水面上には水膜のドームが形成される。
- ③ 水面上のドーム形成後、ドーム上端部は降下を始めドームの消滅過程に入る。これと同時に、水中の空気球も最深部が水圧により上昇を始め消滅していく。水面上のドームと水中の空気球の形成、消滅はほとんど同時に進行している。このとき水中には空気球の消滅によって、②の押し退ける流れとは逆の引き戻す流れが起こるものと思われ、これによって今

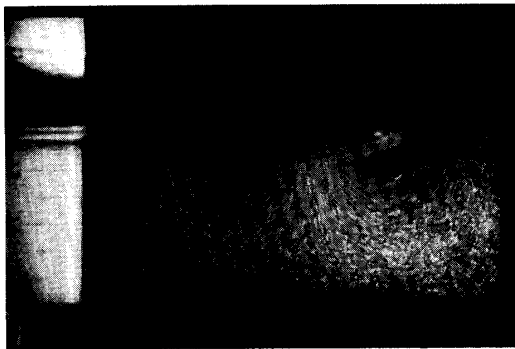
- 度はポリ球が中央へ引き寄せられ、さらには空気球下端部の上昇とともにポリ球も上昇し柱状をなす。
- ④ 水面上のドームと水中の空気球は徐々に消滅していき、ドームの上端部と空気球の下端部はほぼ同時に水面に達し消滅する。このとき水中のポリ球は上昇水流によって更に上方へ引き上げられていく。
- ⑤ 空気球消滅後その下端部は、水深面に達するが、上昇の慣性力により更に水深面以上に上昇しようとする。逆にドームは消滅後それまでの水の落下の慣性力により水深面以下に下がろうとし、上昇水面と下降水面との間に波紋を生じる。この結果中央部にはドームより小さい水の凸部を生じ、その周辺には凹部を生じる。この時上昇を続けていたポリ球はそのまま上昇を続ける。ここでの水の流れは、凸部で引き寄せる流れ、凹部で押し退ける方向への流れを生じていると考えられる。
- ⑥ 中央の凸部とその周辺の凹部は、互いに⑤とは逆の凸部で下降、凹部で上昇という動きをする。このとき水中の流れも⑤とは逆方向になると考えられ、中央部に形成されたポリ球の柱状は上端部より押しつぶされるような形で周辺に広がりながら下降して



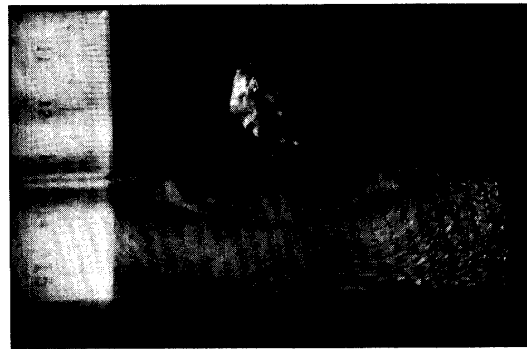
(11)



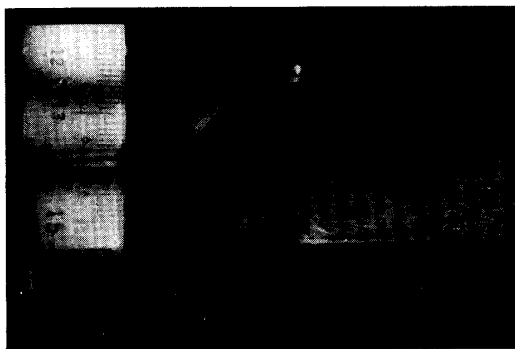
(12)



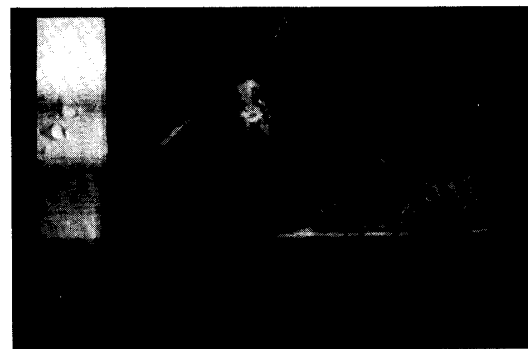
(13)



(14)



(15)



(16)

Photo. 2 Some photographs taken by the single-lens reflex camera

いく。

- ⑦ 以下、徐々に規模を小さくしながら同じような水面の上下運動が続き、これに伴わずかではあるがポリ球も上昇、下降を続けかき乱されるような状態となり最終的に水面が静止状態となったときポリ球の侵食面は埋めもどされる。

(b) 水深 $h=3\text{mm}$ の場合

水深 $h=3\text{mm}$ の比較的水深の小さい時の水中での挙動を(a)の水深の大きい場合の時と比較しながら解析する。

- ① 落下水滴が衝突すると(a)の場合と同様に空気球を形成するが、水深が小さいためポリ球面に空気球が十分達し、横方向に大きく広がっていく。また、この場合も(a)と同様に、押し退けられる力により水が水面上に飛び出しポリ球も中央から外上方向に向けて移動する。
- ② (a)では飛散水によりドームが形成されたが、この水深の小さい場合にはドームは形成されず飛散水はそのまま落下してくるだけである。これは水の飛散角度が外向きに大きかったため(a)のように飛散水上



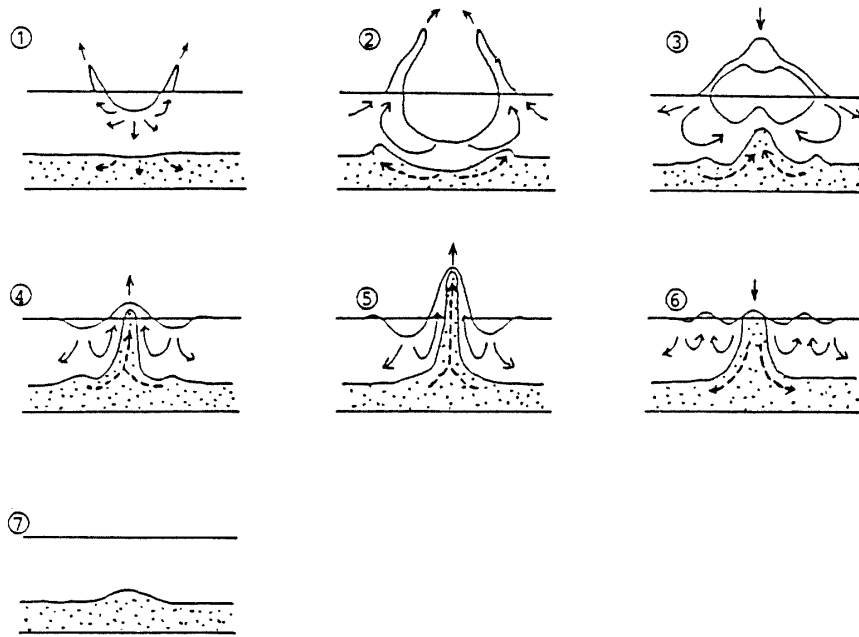


Fig. 10 Schematic diagram of behavior of surface water and sediment  
(a) water depth  $h=10\text{mm}$

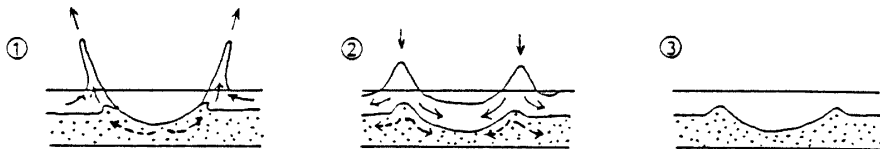


Fig. 11 Schematic diagram of behavior of surface water and sediment  
(b) water depth  $h=3\text{mm}$

端部が集結しなかったためである。また、十分な水圧が無いために(a)③～⑤のようなポリ球の引き戻し現象は起こらない。よって、始めの侵食量に対して飛散水落下時のわずかな引き戻し現象による少量のポリ球の移動があるだけで十分な埋め戻しはなく、結果的にせん孔を生じることになる。

- ③ この後、若干の水面の乱れによるポリ球の動きはあるが、侵食量にほとんど影響はなく始めの水滴衝突によるせん孔と、その周辺に生じた盛り上がり砂を残して現象は終了する。

### 3.2.2 一眼レフカメラによる写真撮影結果の解析

Photo. 2の(11)～(16)は2.2.1の実験により撮影した写真である。これらについて解析していく。

- ① Photo. 2-(11)は水中にアルミ粉を入れ、水滴が水中

に侵入する前の静止状態のものである。

- ② Photo. 2-(12)は水滴の侵入により3.2.1で述べた空気球形成後の、これから消滅しようとする瞬間(1/60秒間)を撮影している。これには、空気球周辺の水流の方向が途中変わったことを示す釣りばり状のトレーサーによる流線が写っている。これは、3.2.1(a)③で説明した、空気球は周辺の水を押退け、消滅し始めると今度は周辺の水を引き寄せるといった現象を裏付けている。

- ③ Photo. 2-(13)～(16)は空気球、ドームの状態からみて外側から内側上部方向に向かう流線を示していると思われ、水が中央上方に引き寄せられていく状態のものだと思われる。

Photo. 2-(13)の水深 $h=30\text{mm}$ の場合は、底面に及ぼす影響はほとんど見られない。

Photo. 2-(14)からは、水流が底面に影響を及ぼす様子が見受けられるようになる。Photo. 2-(15), (16)と水深が小さくなるに連れて、流線は水平方向を向くようになり、外側への広がりが大きくなってくる。

#### 4. 結 論

##### 4.1 圧力測定実験

- (1) 実験室内の模擬降雨装置による落下水滴の衝撃力は無次元化することによって、自然降雨による衝撃力に変換することは可能である。すなわち、これは今後模擬降雨装置による終末速度に達しない落下水滴による侵食量の実験を行う場合、侵食量と落下速度の間になんらかの関係を見い出せれば、これを自然降雨による侵食量に換算することができることを示す。
- (2) ビーズ径の影響はないように思えるが、実験に使用したビーズ径は2種類とも普通の土粒子に比べてかなり大きく、形状や質も異なるため、この衝撃力に及ぼす影響について、そのまま土粒子に適用することには無理があろう。
- (3) 層厚は落下水滴による衝撃力に影響を及ぼすことがわかる。層厚  $z$  (mm) における影響とは、すなわち地表面下  $z$  (mm) における影響ということで、 $z$

が衝撃力に影響するならば、無次元化するとき  $P$  に関する5個の物理量の他に  $z$  も考慮する必要がある。

##### 4.2 写真解析実験

- (1) 水深が大きく、少なくとも  $h=10\text{mm}$  以上ならば、埋めもどしが起こり、水深が小さく  $h=3\text{mm}$  以下では埋めもどし現象は起こらない。埋めもどし現象を起こさない限界の水深は、水深比  $h/D$  と密接に関係する。
- (2) 飛散水は、水中に形成される空気球面と水深面との交点を接点とする空気球面の接線方向に向けて飛び出す。
- (3) 水深が大きい場合、土粒子の侵食、埋めもどし現象は、落下水滴による直接の衝撃力によるものではなく、これによって起こる水流によるものである。
- (4) 水深が小さくなるに連れて、落下水滴によって生じる水流が土壌面に影響を及ぼす範囲は大きくなってくる。

#### 参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一, 土屋義人: 水滴による地面侵食に関する二, 三の実験, 土木論集 35, (1965), p.56-63

(昭和62年4月15日受理)