

# 水滴衝突による土壌の飛散距離および放出角分布

藤原 輝男\*・深田 三夫\*・松崎 浩憲\*\*

## The Experimental Study of Translation of Soil Particles by Raindrop Splashes

### —The Distribution of Exit Angle and Trajectory Distance—

Teruo FUJIWARA, Mitsuo FUKADA and Hironori MATSUZAKI

#### Abstract

Soil erosion is caused by the translation of detached soil toward downslopes. In the case of weak rainfall or at the beginning of rainfall, this phenomenon takes place only by the soil splashes generated by the impact of raindrops striking soil surface.

This paper describes the experimental results of radial and angular distribution of soil splashed by a waterdrop impact. As a result of statistical analysis of experimental data, it became clear that radial, angular distributive density function was expressed by the exponential type,  $\Gamma$  type respectively. Exponential type function contains one parameter  $\lambda$  which is expressed only by the diameter of sand particle and the  $\Gamma$  type contains two parameters  $\alpha$ ,  $\lambda$ . Parameter  $\alpha$  is constant and  $\lambda$  is expressed only by the ratio of sand diameter and waterdrop diameter.

#### 1. まえがき

降雨による土壌侵食量は、地表面に水みち（リル）が発生した後は、リル内の掃流力の大きな流れのため急増していく。そのため土壌侵食研究にはリルの発達過程を取り扱ったものが多い。しかし、地表面にリルが発生してからもMutchlerの研究によれば<sup>1)</sup>リル内からの流亡土砂量は全流亡土量の8割を占め、残りの2割がリル間のインターリル領域からの飛散と表面流によるものである。しかし土性によっては必ずしもリルが発生するものとは限らず、特に透水性の高いものや、降雨強度がそう強くない場合には土粒子の移動は雨滴衝突による飛散か、雨滴衝撃により加速された表面流によるものである。一方、現在のところリルの発生要因については全く不明であり、雨滴による地面の打圧、

飛散現象がリル発生と全く無関係であるという実験、観測事実もない。このことから雨滴による土粒子飛散量は量的には少ないとはいえ、全く無視してよいとも言えない。本研究は飛散現象に目を向け、飛散による侵食量の定量化を目的としたもので、本報ではその基礎となる一個の水滴衝突による土粒子の飛散距離、射出角分布の測定方法、およびその結果について報告する。

従来、雨滴による土壌侵食の問題を解明する方法として、降雨のエネルギーによる解析が行われているが、本報ではこの基礎となる雨滴の落下速度に関してまず検討を行った。現在、落下速度は雨滴径と落下高さの関係からLaws<sup>2)</sup>のグラフを利用しているのが普通であるが、Lawsのグラフは約45年前の実験による結果であり、終末速度を前提とした今回の実験にはその再検討が不可欠であった。そのため、まず雨滴落下速度をマルチストロボを用いて撮影し、雨滴径と落下速度の関係を求めLawsの値と比較した。

つぎに単滴による飛散土量分布を求めるため、水滴

\*山口大学工学部土木工学科

\*\*山口大学大学院土木工学専攻

径、土粒子、湛水深を変化させ、距離別の飛散土量分布、および土粒子の射出角を測定し、飛散分布型を推定した。それぞれの分布密度関数は諸条件下での、任意面積における飛散土量の子測の基礎となるものである。

2. 落下雨滴速度の写真解析

雨滴の落下エネルギーや、運動量と飛散量の関係を明確にするにはまず雨滴の落下速度を知る必要がある。自然降雨の場合は終末速度で地表面に落下してくるので落下速度の測定は主に終末速度で落下が可能な高さ12mの鉄塔を中心に行い、5.7mの場合も加えた。(Photo. 1, Fig. 1)

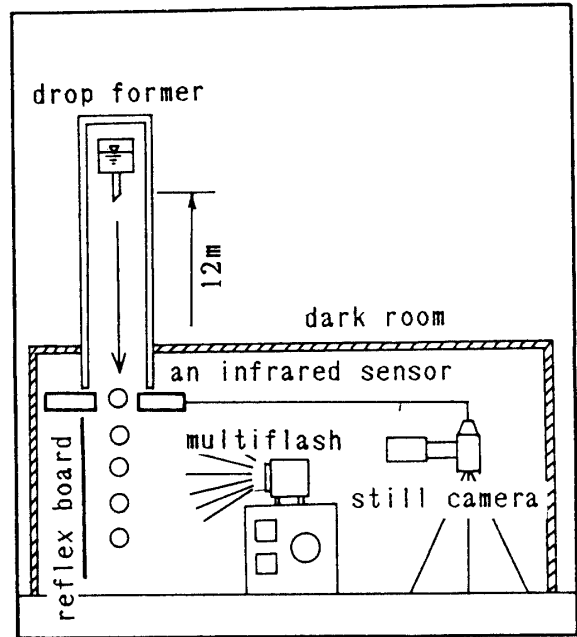


Fig. 1 Experimental apparatus for measuring the velocity of waterdrop

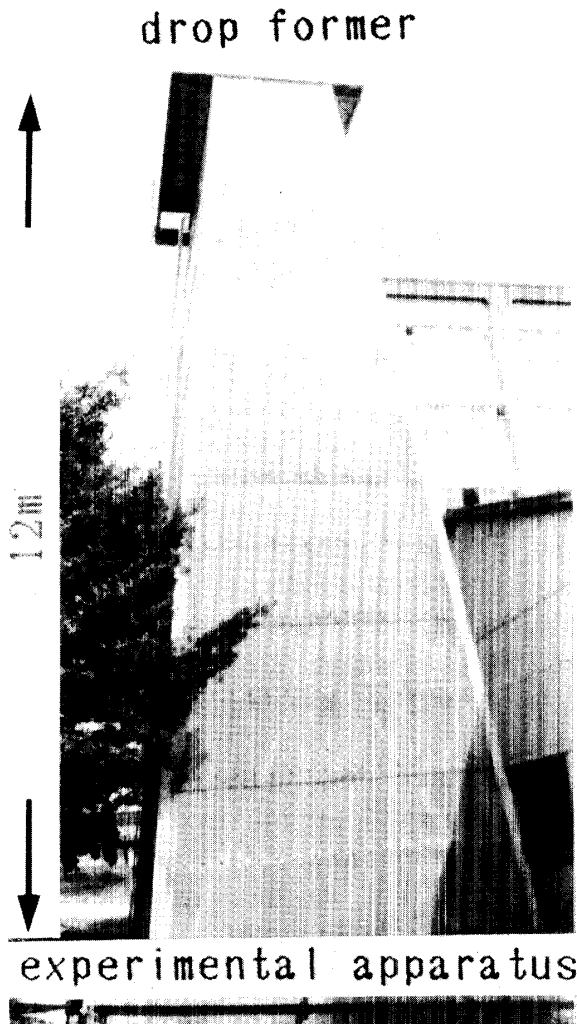


Photo. 1 Drop tower

2.1 実験装置

高さ12mの鉄塔より落下させた水滴が室内の風の影響を受けないように、直径20cmのパイプを設置し、その中で水滴を落下させて測定を行った。一定時間間隔で水滴を落下させるためにヘッドタンクに水を注入し、一定圧力をノズルにかけ、オーバーフローした水は外部に排出させる。水滴径を変化させるには径の異なる金属性のノズルを数種類用いた。さらにパイプ下方より空気流入による影響を軽減するため、上部をふさいだ。

2.2 撮影方法

落下速度の測定には以下に述べる二種類の方法で行った。ひとつにはマルチストロボを用い多重映像撮影する方法、ひとつは自作の回転円盤式の機械的ストロボ装置で(Photo. 2)、回転円盤にスリットをあけてカメラのレンズの前で回転させ、間欠的に露光させるものである。この場合、円盤の回転数はフォトトランジスターを用いた計数回路の電磁カウンターで行い、回転周期とフィルム上の水滴間距離とから落下速度を算出した。いずれも撮影時には背後に暗箱を用い、写真映像からの解析が容易になるようにした。最初の方法では、マルチストロボの周期を検定するため、空気抵抗の無視できる金属球を落下させてキャリブレーションを行った。つぎに水滴を12mの高さより落下させ、



Photo. 2 Apparatus for measuring the velocity of waterdrop

マルチストロボを用いて多重撮影し落下速度を測定した。

### 2.3 解析方法

#### 2.3.1 水滴の落下速度

一定周期で発光するマルチストロボにより映し出された雨滴間距離 $\Delta H$ と周期 $\Delta T$ により、落下水滴速度が求められる。回転円盤式マルチストロボによる方法でも同様に、写真映像の水滴間距離と円盤の回転数がわかれば算出できる。

#### 2.3.2 マルチストロボの検定

マルチストロボの発光周期の検定は、金属球が等加速度で自由落下しているとみなし、多重撮影された球と球の距離の増加により求めた。終末速度ではマルチストロボによる多重撮影の水滴間間隔の増加は0になる。多重撮影の映像において、いま水滴が落ち始めた点から最初の像までの時間 $T$ に対する落下距離を $H_0$ 、1~2, 2~3番間の映像の距離をそれぞれ $\Delta H_1, \Delta H_2$ としその間のマルチストロボの周期を $\Delta T$ とすると、次式が導かれる。

$$H_0 = 1/2gT^2$$

$$H_0 + \Delta H_1 = 1/2g(T + \Delta T)^2$$

$$H_0 + \Delta H_1 + \Delta H_2 = 1/2g(T + 2\Delta T)^2$$

これらより、 $\Delta T = \sqrt{\frac{\Delta H_2 - \Delta H_1}{g}}$

周波数  $f = \frac{1}{\Delta T} \sqrt{\frac{g}{\Delta H_2 - \Delta H_1}}$

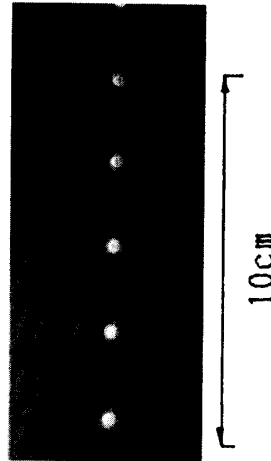


Photo. 3 Multiflash photograph of a falling metal ball

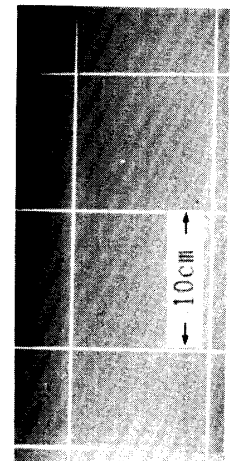


Photo. 4 Typical velocity photograph obtained with apparatus Photo. 2

### 2.4 解析結果

#### 2.4.1 マルチストロボ周期の検定結果

Photo. 3に金属球の落下状況の写真を示す。 $\Delta H_1, \Delta H_2$ のような映像間の距離の測定は、計測誤差を少なくするため印画紙に焼き付けず、ネガを用いて拡大投影された像を用いて行った。多重撮影の映像を10個選んで計算を行った結果、本実験でのマルチストロボ周期は $\Delta T = 7.09 \times 10^{-3} \text{SEC}$ で、周波数  $f$  は $f = 141 \text{Hz}$ であった。

#### 2.4.2 水滴径別の落下写真解析結果

落下高さは、12m, 5.7mに固定し、水滴径としてはTable 2のような5種類のものを用いた。また参考のためPhoto. 2の装置で撮影されたストロボ写真をPhoto. 4に示した。Fig. 2に測定結果をまとめてあるが、落下高12mの場合に、Lawsの実線曲線上における落下高8mにほぼ一致する結果となった。本実験の12mからの落下水滴速度と水滴径の関係は、Lawsのグラフと同じ傾向であるが落下速度が小さめにでた。この原因はマルチストロボの発光周波数の検定において、光量不足のため鮮明な写真を撮ることができず(16倍増感を行ったため、不鮮明な像になった)安定性に欠ける結果となり、このことが落下速度が小さめにでた原因である。また、落下高さ12mにおいて、落下水滴速度は今回の写真解析では $\Delta H_1, \Delta H_2$ 間の差が認められず、水滴はほぼ終末速度で落下していると言える。なお、より強力かつ正確なマルチストロボを用い、広範囲にわたり撮影可能になれば、落下高さ、雨滴径、落下速度の関係が、明確になるのであろう。

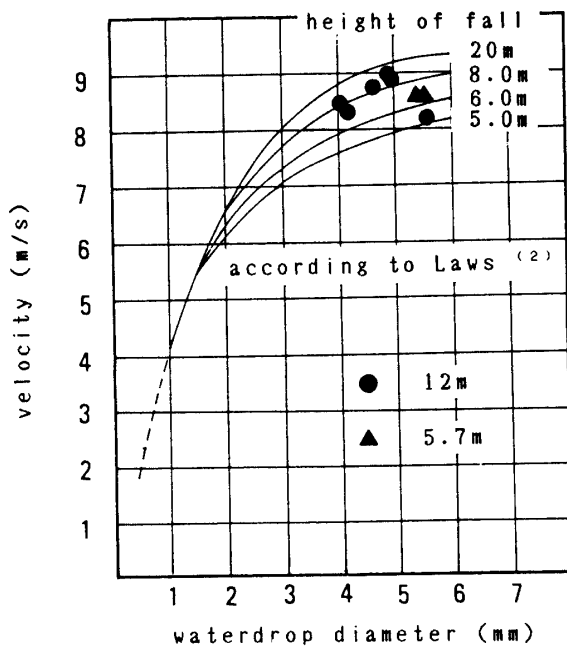


Fig. 2 Velocity of falling waterdrops obtained by apparatus Photo. 1, 2

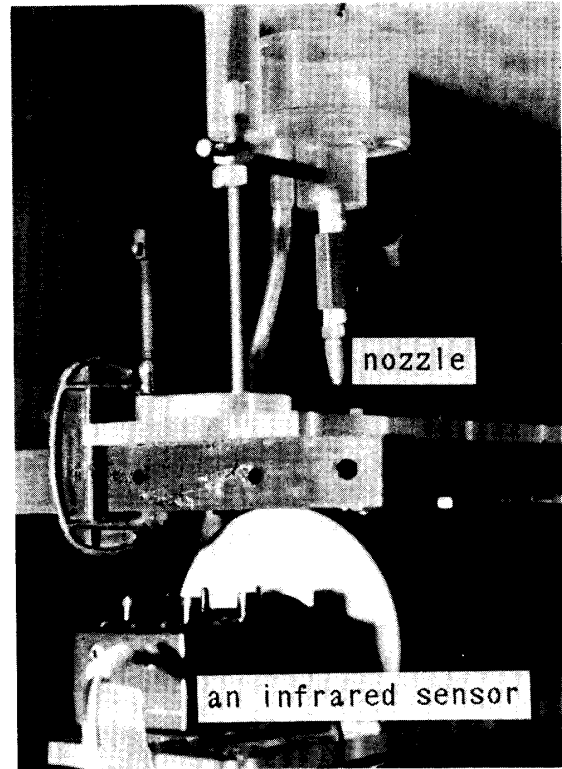


Photo. 6 Photograph of drop former

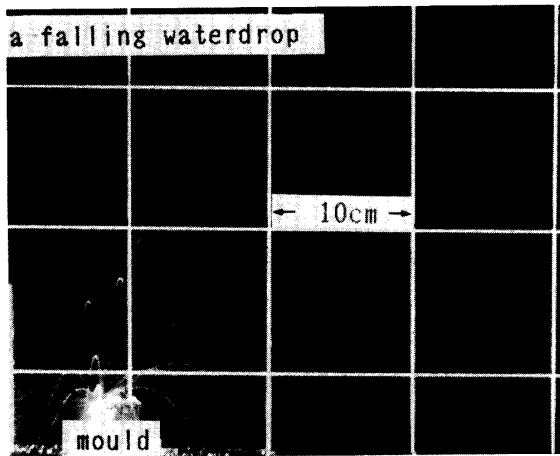


Photo. 5 Trajectories of splashed soil

### 3. 土粒子飛散分布に関する実験

Photo. 5の例に見るように水滴衝突後に飛散する土粒子の到達距離、放出角は特定できないが、統計的に見れば水滴の持つエネルギー、土粒子の大きさ、土壌の含水比などをパラメーターとしてもつ密度分布関数によって表されることが推定できる。衝突によって飛散する個々の粒子は放物線軌道を描くものとする、その到達距離 $r_1$ は、初速度 $v_{01}$ 、放出角 $\beta_1$ を用いて

$$r_1 = 2/g \cdot v_{01} \cos^2 \beta_1 \tan \beta_1 \quad (1)$$

で表される。一方、傾斜角 $\alpha$ の斜面を考えると下端に向かって飛散距離が延びるため、一個の雨滴による土粒子飛散量の重心は傾斜下端へ移動していく。斜面上で一個の飛散粒子 $i$ の到達距離、飛散方向角をそれぞれ $R_i$ 、 $\theta_i$ とすると次式のようなになる。

$$R_i = 2v_{0i}^2 \cos^2 \beta_i / g \cdot (\tan \beta_i + \tan \alpha \cos \theta_i) = r_i \tan^{-1} \beta_i (\tan \beta_i + \tan \alpha \cos \theta_i) \quad (2)$$

射出角 $\beta_i$ 、射出速度 $v_{0i}$ が方向性を持たず、飛散距離、射出角が密度分布関数

$f(r_i, \beta_i) = f_1(r_i) f_2(\beta_i)$ によって表されると仮定すると、一個の雨滴による飛散粒子の斜面方向の重心の移動量は

$$x = \langle R \cos \theta \rangle = \langle r \tan^{-1} \beta \rangle \tan \alpha \quad (3)$$

となる。 $\langle \rangle$ は密度分布関数による平均を示す。(3)式は斜面傾斜方向への飛散量を推定する基礎となる式であるが、これを使用するためには $r_i$ 、 $\beta_i$ の分布関数を知る必要がある。

### 3.1 実験装置

#### 3.1.1 水滴落下装置

Photo. 6に水滴落下装置を示す。水滴の落下速度測定実験に使用した落下装置で水滴を落下させ、径の異なるステンレス管を着脱して発生する水滴径を変える

Table. 1 Diameter of sample sand (mm)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.23	0.46	0.78	0.93	1.10	1.30	1.55	2.19	3.10	3.60

Table. 2 Diameter of waterdrop (mm)

No.	1	2	3	4	5
	3.40	4.02	4.60	4.92	5.52

ようにした。水滴径はTable 2の3.4mmを除いた4種類とし、50~100滴採取して重量を測定し、その質量より水滴径を算定した。

3.1.2 試料作成

実験用試料としては、Table 1に示すような0.21~4.00mmのJIS規格のふるいを通過した10種類の砂のうち、飛散距離測定実験にはNo.2, 4, 6のものをを用い、放出角測定実験にはNo.1からNo.10までのものをを用いた。飛散距離測定用には内径2.66cm、高さ3.53cmの金属性モールドを、飛散角測定の場合には内径12cm、深さ2.0cmのプラスチック性円形容器に乾燥密度が約1.4g/cm<sup>3</sup>（締固めを行わない状態）になるように詰め、約30分間浸水させ飽和状態にした後に使用した。

3.1.3 飛散実験装置

水滴がモールド内に落下して試料砂を飛散させるが、この距離と飛散土量の関係を知るために、Fig. 3のようにモールド中心より5cm間隔に80cmまで区切り飛散土量を飛散距離別に測定した。飛散土の質量は、一区画毎の全土粒子質量が多くて質量が測定可能な場合、乾燥したものを容器と共に測定し、また数が少ない場合には個数を数え、それに土粒子一個の平均質量を乗じて求めた。また、解析の際、飛散距離はモールド中心から区画の中間までとした。またモールド上部の水深は1mm単位で変化させることが可能で、飛散により失われた水量は別タンクより直ちに給水するようにして水位を一定に保つようにした。なお、今回はモールド上端面に水位がくるような状態（湛水深=0）で実験を行った。

3.1.4 放出角分布測定装置

Photo. 5のように飛散は確率的な現象と考えることができ、雨滴衝突後の土粒子の放出角、放出速度はある分布をもった密度分布関数で表されると推測される。この実験では、放出角の分布関数を決定するために

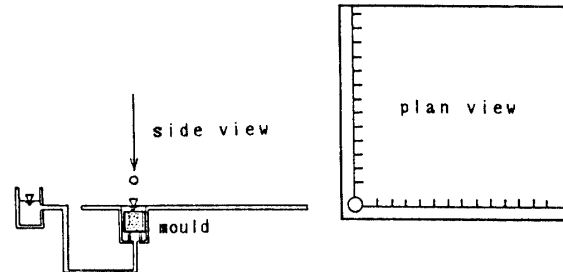


Fig. 3 Apparatus for measuring the projective distance of splashed soil

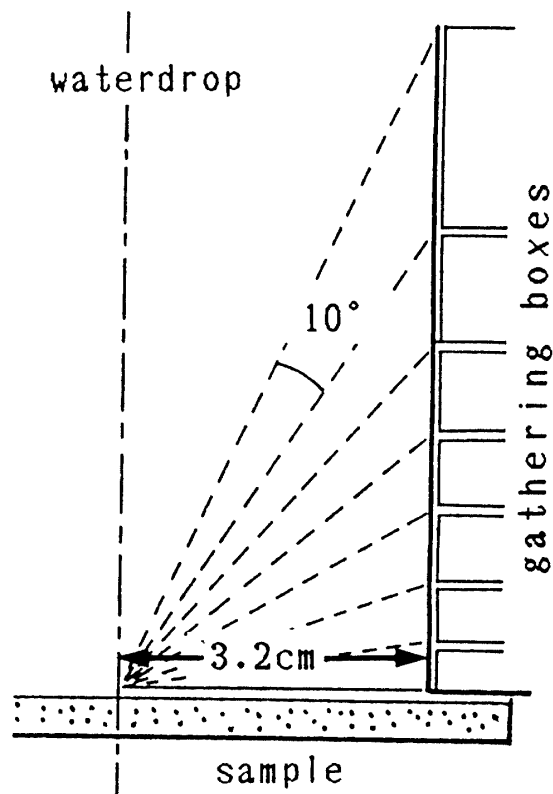


Fig. 4 Apparatus for measuring the exit angle of splashed soil



Photo. 7 Photograph of apparatus for measuring the exit angle of splashed soil

Photo. 7, Fig. 4に示すようなアクリル製の飛散土粒子捕集装置を作製した。この装置によって放出角分布が $10^\circ$ 単位で求められ、これらをもとに分布関数の推定を試みた。

### 3.2 実験方法

#### 3.2.1 飛散距離分布

実験は一つのモールドに対し、約1秒間隔で10滴落下させ、計5つのモールドを使い、50滴による飛散土量を測定した。一つのモールドに10滴しか落とさないのは、表面水が無い場合、試料表面が侵食されて土壌表面に凹凸が生じ、土壌面平坦という条件が保てなくなるからである。

#### 3.2.2 放出角分布

径12cm、深さ2cmに充填した飽和砂層をPhoto. 7のようにターン・テーブルにのせ、回転しながら一滴づつ50滴落とし、その間の飛散量を捕集した。同様のことを4~5回繰り返した。このようにターン・テーブルを用いる理由は水滴の衝突面を変えて衝突面形状変化による影響を防ぐためである。

### 3.3 解析方法

#### 3.3.1 飛散距離分布

岡<sup>3)</sup>は、単滴による飛散現象に当てはまる分布密度関数を次の(4)式のような指数関数で表した。ここでは、土粒子径を3種類に変化させ水深の無い場合と水深1mmの場合について水滴の終末速度により実験を行った結果をまとめている。

$$\phi(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (4)$$

$\phi(x)$ : 分布密度関数

$x$ : 飛散距離と土粒子径の比 ( $l/d$ )

ここで、(4)式の両辺を対数にとると一次の関係式になり ( $Y=A+Bx$ :  $Y=\log\phi(x)$   $A=\log\lambda$   $B=-\lambda\log e$ ) 区間毎の飛散量を最小自乗法を用いて整理し、密度分布関数を推定した。

#### 3.3.2 放出角分布

Fig. 9の例で示されているように放出角分布は砂粒子径によって異なり、約1mm以下の砂の場合には $10\sim 15^\circ$ に最大値をもち、1mm以上になると指数的に急減していくような分布形になっている。このことから飛散距離分布の解析で用いた指数分布形は使用できず、次の $\Gamma$ 分布形を仮定した。

$$\phi(\theta) = \alpha\lambda/\Gamma(\lambda) \cdot \theta^{\lambda-1} e^{-\alpha\theta} \quad (0 < \theta < \infty) \quad (5)$$

$\lambda=1$ のときは先の指数分布となる。母数 $\alpha, \lambda$ の推定はモーメント法により実験データより平均放出角 $\Theta$ , 放出角分散値 $\Delta^2$ を求め、

$$\Theta = \lambda/\alpha, \quad \Delta^2 = \lambda/\alpha^2 \quad (6)$$

(6)式より $\lambda, \alpha$ を求め分布密度関数を決定した。

### 3.4 解析結果

#### 3.4.1 飛散距離分布

分布密度関数 $\phi(x)$ を求めるために、まず各実験について捕集装置の各区間別の飛散土量のヒストグラムの例をFig. 5に示した。縦軸には各区間別の飛散土量割合 [%] を、横軸には飛散距離を上粒子径 $d$ で除した値 $x=1/d$ をとった。Fig. 5のヒストグラムの $x$ と $\phi(x)$ との関係を一次式で近似したのがFig. 6の直線である。

次にFig. 6で示された一次近次式の傾き $B$ , 切辺 $A$  落下エネルギー、試料砂粒径との関係をFig. 7, 8にまとめた。Fig. 7(a)は横軸に落下水滴エネルギー、Fig. 7(b)の横軸には砂粒子径をとり、それぞれ縦軸には切辺 $A$ をとった。

Fig. 7(a)より、落下水滴エネルギーに、またFig. 7(b)は土粒子径 $0.4\sim 0.9\text{mm}$ 範囲においてバラツキが見られるがほぼ一定値をとった。

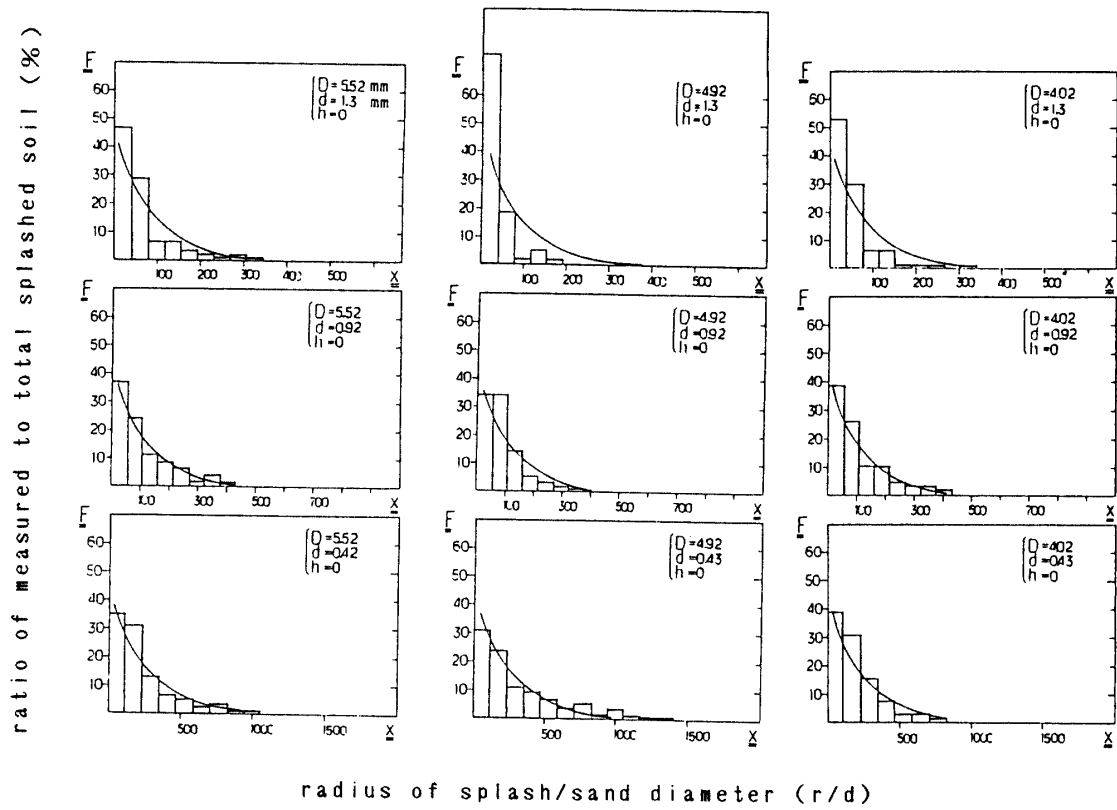


Fig. 5 Radial distribution of soil splashed by waterdrop impact and distributive density function obtained by this histogram

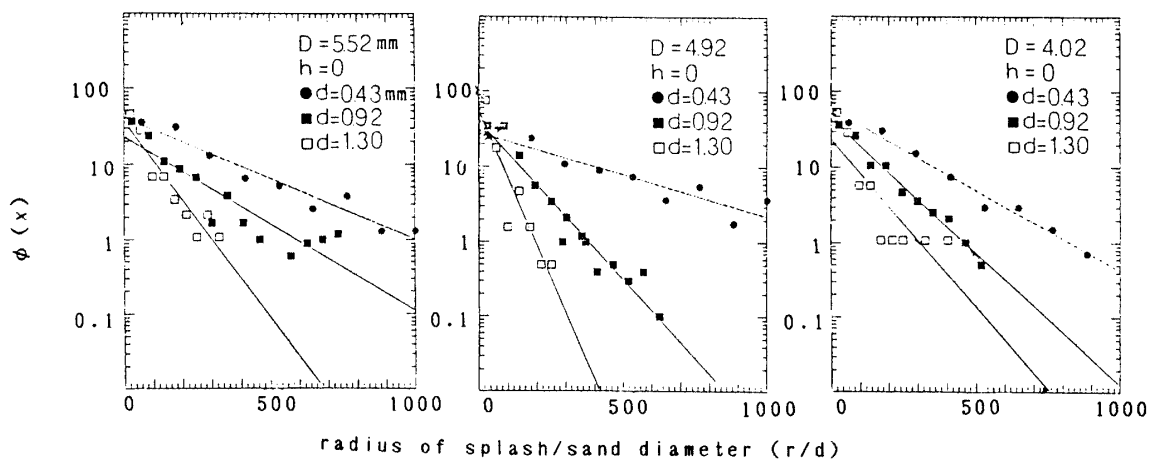
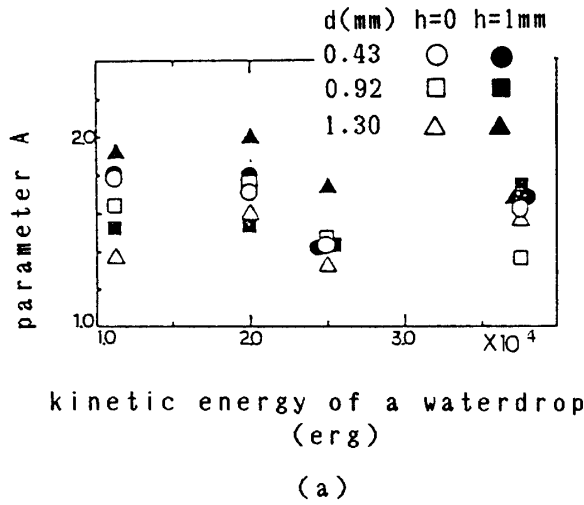


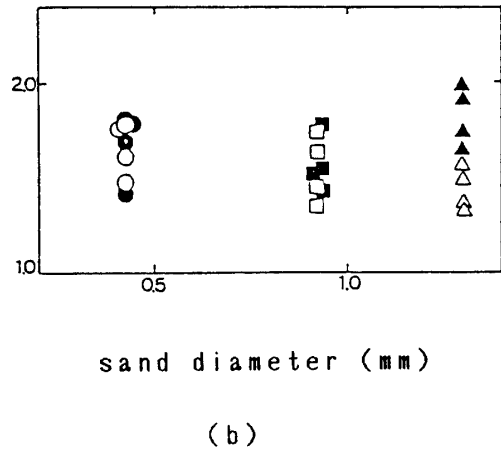
Fig. 6 Relationship between  $r/d$  and  $\phi(x)$



kinetic energy of a waterdrop (erg)

(a)

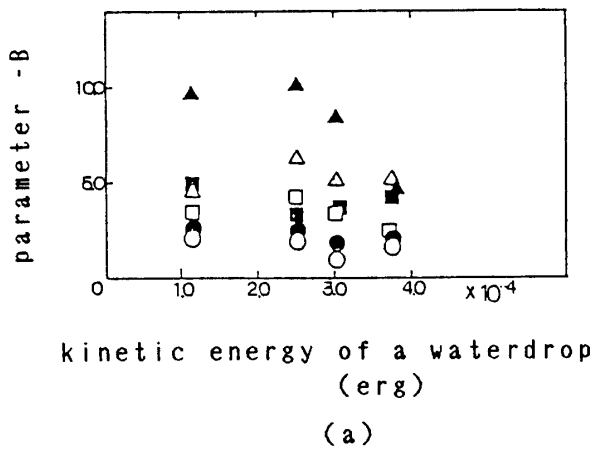
Fig. 7 (a) Relationship between waterdrop energy  $E^d$  and parameter A



sand diameter (mm)

(b)

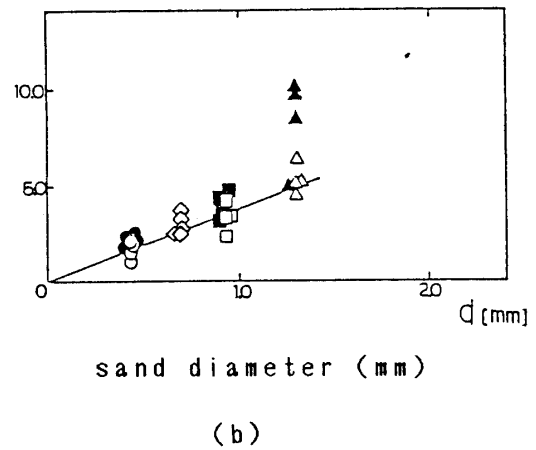
Fig. 7 (b) Relationship between sand diameter  $d$  and parameter A



kinetic energy of a waterdrop (erg)

(a)

Fig. 8 (a) Relationship between waterdrop energy  $E^d$  and parameter -B



sand diameter (mm)

(b)

Fig. 8 (b) Relationship between sand diameter  $d$  and parameter -B

また、傾きBについては横軸に落下水滴エネルギー、および砂粒子径をとったときの関係をFig. 8(a), (b)に示した。エネルギーとの関係はあまり見られず、砂粒子径とBとは水深のない場合には比例関係となり、水深のある場合では、砂粒子径が1mm以下のときに同様の傾向がみられた。ここで、土粒子飛散で問題となる1mm以下の土粒子に限り、指数分布形のパラメータをグラフより決めると(7)式になる。

$$\phi(x) = 8.86 \times 10^{-3} d \exp(-8.86 \times 10^{-3} dx) \quad (7)$$

また $\phi(x)$ を用いて、求めるx地点を中心とした区画に飛散する割合は次式で表される。

$$R_i = \int \phi(x) dx$$

$R_i$ : x地点のi区画への飛散割合

$x_i$ : i区画目の始点

$x_{i+1}$ : i区画目の終点

(8)

(8)式によって求めた飛散ヒストグラムとの適合をFig. 5に示す。区画別の飛散量を区画中心までの距離に集計して飛散割合としたヒストグラムは離散型の確率分布である。しかし、 $\phi(x)$ による連続な近似式に置き換えることにより、落下地点からの任意距離での飛散割合を直ちに求めることを可能とした。



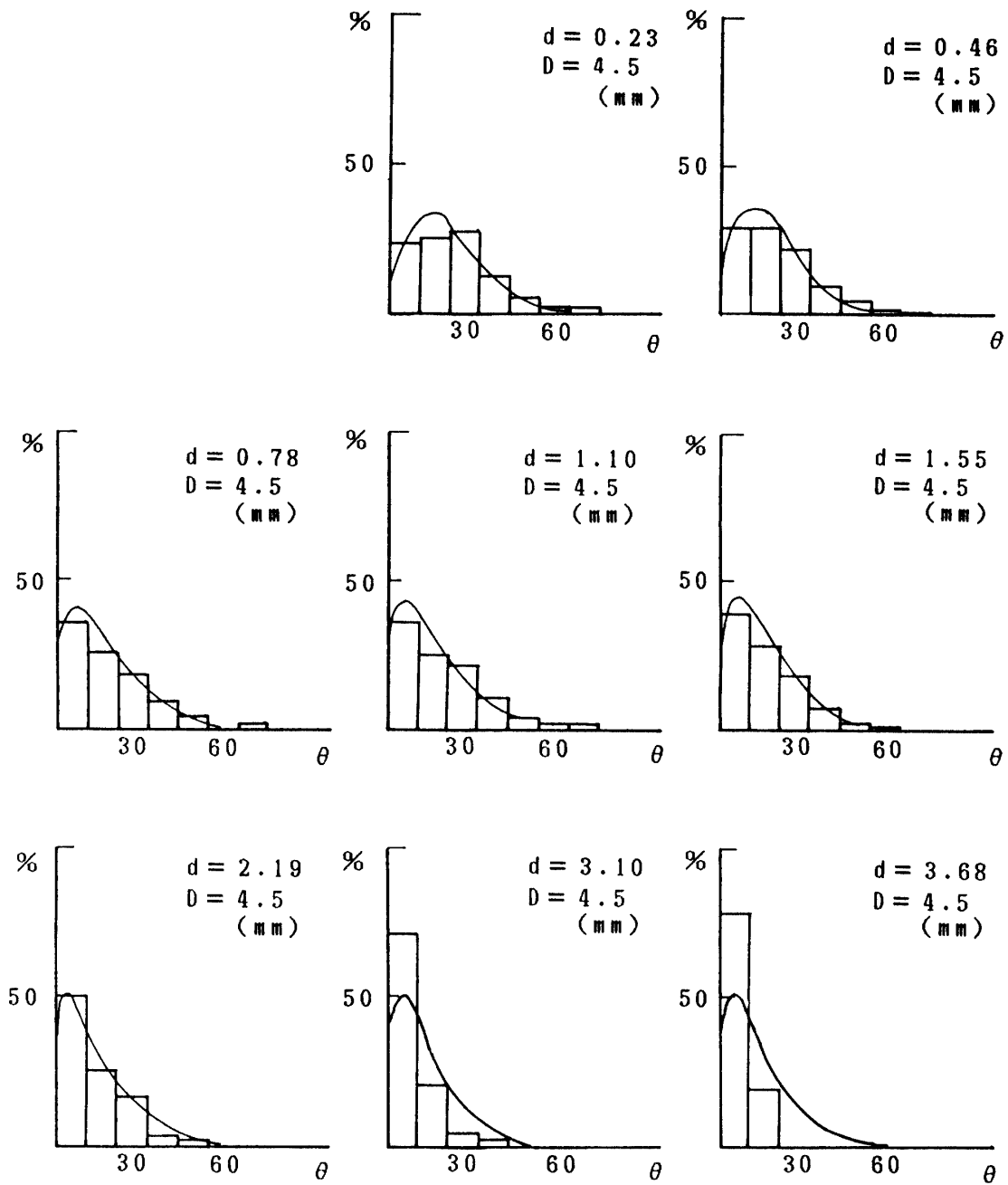


Fig. 9 Angular distribution of soil splashed by waterdrop impact and  $\square$  distributive density function obtained by this histogram

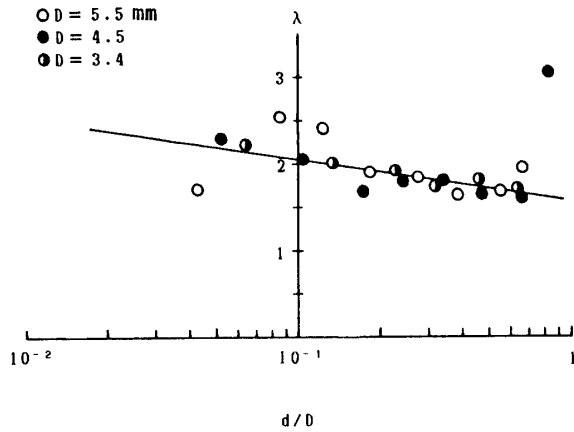


Fig. 10 (a) Relationship between  $d/D$  and parameter  $\lambda$

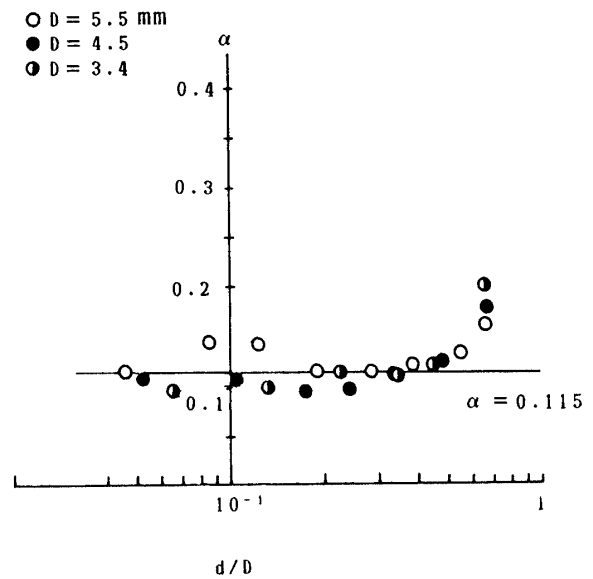


Fig. 10 (b) Relationship between  $d/D$  and parameter  $\alpha$

### 3.4.2 放出角分布

10 間隔で採取した飛散砂の度数表よりモーメント法を用いて求めた $\lambda$ ,  $\alpha$ と粒径比 $d/D$ の関係をFig. 10(a), (b)に示した。ここまでまとめたデータは終末速度の場合を含んでおらず、高さ5.7mからの3種類の径をもった水滴のみであるが、(運動量範囲73.6~15.8g・cm/s)落下速度に関係なく、 $\alpha$ の場合は粒径比が約0.4以下において一定値 $\alpha=0.115$ をとり、 $\lambda$ の場合は粒径比のみによって表され、 $\lambda=1.55-0.5\log(d/D)$ となる。測定値のヒストグラムとの適合性をFig. 9にしめた。

### 4. あとがき

飛散距離の場合Fig. 6において分布型を一次近似したが水深のある場合は、多少無理な近似であった。実験中のモールドへの給水装置が完全でなく、水深条件を一定に保てなかったことが原因の一つと考えられる。水深の無い場合は全体的によく指数分布に適合してい

た。この二者の差が実験による測定誤差であるのか、また水深がある場合、さらに新たな因子を考慮し、解析をする必要があるのが問題点である。放出角分布の測定の場合、Photo. 7, Fig. 4の捕集装置で水滴の衝突面の大きさをどのくらいにしたらいかという問題が残る。即ち容器が大きいと飛散粒子が捕集箱まで到達しないし、逆に小さいと飛散粒子が捕集箱の壁に衝突して跳ね返り、捕集されにくいという問題が生じる。

### 参考文献

- 1) Mutchler.C.K and Young.R.A. Soil detachment by rain drops, A.R.S-S, USDA-ARS, Vol. 40. p.113-p.117, 1975
- 2) Laws.J.O Measurement of the fall-velocity of water-drops and raindrops, Transactions of American Geophysical Union p.709-p.721, 1941
- 3) 岡 克彦, 単位面積・単位時間当りの飛散土量の実験的研究, 山口大学卒業論文, 1984

(昭和62年10月15日受理)