

降雨による飛散土量分布に関する一考察

藤原 輝男*・南 信弘**・中山 義一***

A Consideration on the Quantitative Distribution of Splashed Soil by Rainfall

Teruo FUJIWARA, Nobuhiro MINAMI and Yoshikazu NAKAYAMA

Abstract

One of the process of soil erosion phenomena by natural rainfall is the soil-particle detachment by raindrops. It is well known that the detached soil particle is easily transported by the water flow, so that soil erosion is advanced.

This study is the basic analysis of the relationship between rainfall energy as an impulse by falling raindrop and the amount of detached soil.

In the first place, we made the simulation analysis based on the data of splashed soil by single raindrop and obtained the following distribution density function of splashed soil:

$$f(X) = C \cdot \exp(-BX^A)$$

Then, we determined parameters A and B and relate them with the rainfall energy by the experiment using rainfall simulator.

Finally, SP_{unit} which is the amount of splashed soil from unit area was calculated using the obtained values of A and B. The resultant SP_{unit} was compared with the experimental value.

1. まえがき

土壌侵食現象は、複雑な因子を含む現象で、とくにその定量的解析は非常に困難で、いまだ十分な現象の解明と侵食量の予測に至っていないのが現状である。

侵食現象は雨滴の衝撃力による土粒子の剥離、輸送および地表流水による剥離、輸送という4つの過程から成り立つと考えられるが、リル侵食あるいはガリ侵食の前段階の面状侵食においては雨滴衝撃による剥離、輸送が卓越していると言われており、面状侵食の段階での雨滴衝撃力の影響度を把握することは重要であるにも拘らず、現象の複雑さのためにほとんど研究が行なわれていない状況下にある。

雨滴衝撃力による土粒子の剥離量については、過去に単滴による剥離量の研究を行ったが、実際の自然現象では、多数の雨滴にさらされて地表面は不規則な凸凹の形状を呈し、剥離量もこの形状に強く影響される

と考えられるため、単滴による研究では不十分であり、多数の雨滴すなわち長時間雨滴衝撃にさらされた時の剥離量を求める必要がある。さらに、剥離された土粒子は穿孔附近に堆積又は飛散し、地表面が傾斜角を持っている場合傾斜面下方への堆積及び飛散する土粒子が相対的に増加し、徐々に土粒子は下方に移動していくと考えられ、移動する飛散土量を量的に把握するためにも単位面積からの飛散土量、および飛散距離に関してどれ程の飛散土量が分布するかという飛散土量の分布型を求める必要がある。

以上のことから、本研究では、単位面積当りの剥離量、および傾斜面に沿って移動する土量を求めるための基礎となる飛散土量分布型を推定することを目的とし、飛散土粒子に関する実験を行い、その結果について解析、考察を行なった。

2. 解析方法概要

土粒子の飛散現象に含まれる要因としては、落下する雨滴の運動エネルギー、土粒子の粒径、土壌水分、地表面の形状などが考えられるが、各要因のそれぞれ

* 土木工学科

** 高知大学農学部

*** 大学院土木工学専攻

の影響を考慮して理論的に飛散土量分布型を求めることは非常に困難で、本研究ではこれらを包含して実験的に求める方法をとった。

土壌試料に降雨が与えられたときの飛散現象を考える場合、単位面積からの土粒子はランダムな方向へ飛び出すと考えられるが、長時間にわたって現象が進行すると土粒子が飛散する単位面積を中心として、任意の距離にどれ程の土量が飛散するかという飛散土量の分布が形成される。ある地点に飛散してくる土粒子は、土壌試料の各地点からのものであり、任意の地点からどれ程の土粒子の量が飛散してきたかということを求めるのは困難であり、また、ある地点から飛散する土粒子の量と他の各地点から飛散してくる土粒子の量は、互いに相殺し合い平衡状態にあるため、飛散によってある地点から移動する土粒子の量のみを直接求めることはできない。

よって、単位面積からの飛散土量の分布、および飛散土量を求めるために細かく区画した容器を用いて飛散土粒子を捕集する実験を行うとき、試料面積を小さくすればよいが、そうすれば、飛散土粒子による試料の減少によって実験条件を一定に維持することができず、長時間降雨を与えると実験精度が悪くなり、また、試料面積を大きくすれば、各区画に飛散する土粒子は試料全体から生じ、単位面積からのみの飛散土量分布、土量を求めることが難しくなる。

したがって、十分広い試料面積を用い、長時間降雨を与える実験により飛散土量分布を求めるためには、まず、分布の密度関数型を仮定し、実験結果により仮定された密度関数の係数を決定する方法が有効であると考え、本研究では、以上の手順に従って実験およびその解析を進めた。この密度関数型の決定に際しては、予備実験により求められた基礎データを基にし、実験状態において考えられる条件についてシミュレーションを行い、その結果を用いてほぼ満足できる関数型を仮定した。

3. シミュレーションによる密度関数の決定

非常に複雑な現象である土粒子飛散現象をモデル化し、実験条件についてのシミュレーションを行って飛散分布の状態を調べこれらを用いてその分布密度関数を求めた。

3.1 シミュレーション方法

土粒子の粒径が比較的大きい場合、落下雨滴と飛散土粒子は弾性衝突を行うこともあるが、粒径が小さい

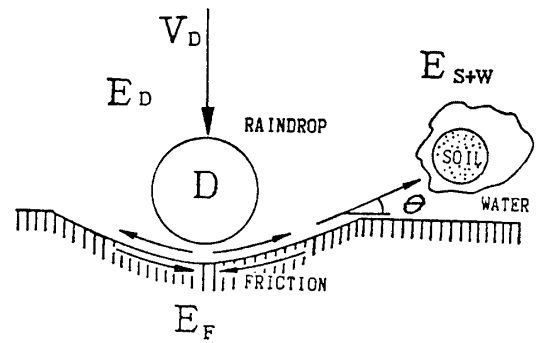


Fig. 1 Schematic diagram of a particle struck by a raindrop.

場合、落下雨滴が地表面に到達すると、地表面の土粒子を剥離しながらその穿孔に沿って流動し、飛散水、飛散土粒子と共に飛び出すものと考えられる (Fig. 1)。このように、飛散土粒子は個々の土粒子だけでなく、団粒状となって飛散水に含まれて飛び出すものと考え、シミュレーションはこのモデルに従って進めることとした。

Fig. 1 に示すモデルを用い、エネルギーの見地から飛散現象を考えて行く。Fig. 1 中の記号は

- D : 落下雨滴径
- V_D : 落下雨滴速度
- v : 飛散土粒子および飛散水の初速度
- θ : 飛散土粒子および飛散水の出射角
- E_D : 落下雨滴の運動エネルギー
- E_F : 雨滴地表面衝突時、および出射の際の摩擦抵抗によって消費されるエネルギー
- E_{S+W} : 飛散土粒子、飛散水に与えられるエネルギー

エネルギー保存則より

$$E_D = E_F + E_{S+W} \quad (1)$$

$$1 = \frac{E_F}{E_D} + \frac{E_{S+W}}{E_D} \quad (1)'$$

ここで、 $E_F/E_D = \epsilon_F$ 、 $E_{S+W}/E_D = \epsilon_{S+W}$ とおき、それぞれを地表面衝突および摩擦抵抗によるエネルギー消費率、飛散土粒子、飛散水に与えられるエネルギー変換率とすると

$$E_{S+W} = \epsilon_{S+W} \cdot E_D \quad (2)$$

$$= (1 - \epsilon_F) E_D \quad (2)'$$

飛散土粒子、飛散水の質量をそれぞれ m_s 、 m_w とすると与えられたエネルギーによる出射速度 v は

$$v = \sqrt{\frac{2E_{S+W}}{m_s + m_w}} \quad (3)$$

出射角 θ は、土粒子のもつ安息角を越えないとすると、 ϕ を内部摩擦角として

$$0 \leq \theta \leq 45^\circ + \phi/2 \quad (4)$$

の範囲のものと仮定すれば、飛散距離 x は

$$x = \frac{v^2}{g} \sin 2\theta \quad (5)$$

で求まり、出射点から距離 x の位置に飛散土量 m_s が落下することになる。

今、任意の直径 D の雨滴が落下したとすると、 θ は土粒子形状、地表面の状態に依存され、出射速度 v は雨滴によって与えられるエネルギーによって変化すると考えられる。

基準雨滴径を D_0 とし、この基準雨滴径による後述の諸量の添字に 0 をつけることにすると、

$$\frac{D}{D_0} = \eta \quad (6)$$

$$V_D = V_{D0} f_v(\eta) \quad (7)$$

南²⁾によると $f_v(\eta) = 1 - \exp(-\eta/2)$ である。

よって E_D は水の密度を ρ とし次式のようになる。

$$E_D = E_{D0} f_E(\eta), \quad E_{D0} = \frac{\pi}{12} \rho D_0^3 V_{D0}^2 \quad (8)$$

$$f_E(\eta) = \eta^3 \cdot f_v^2(\eta)$$

まず、土粒子 1 個に作用する摩擦力 F_d を考える。摩擦抵抗に関する係数 μ_F 、水の密度を ρ とおいて、 F_d は雨滴重量に比例するとして

$$F_d = \alpha_1 \mu_F \rho g D^3 \quad (9)$$

穿孔表面に露出する土粒子の個数 n_d は、土粒子粒径 d 、穿孔面積を A_D とし

$$n_d = \frac{A_D}{\alpha_2 d^2} \quad (10)$$

A_D は落下雨滴と地表面が接する面積に比例するとして

$$A_D \propto \alpha_3 D^2 \quad (11)$$

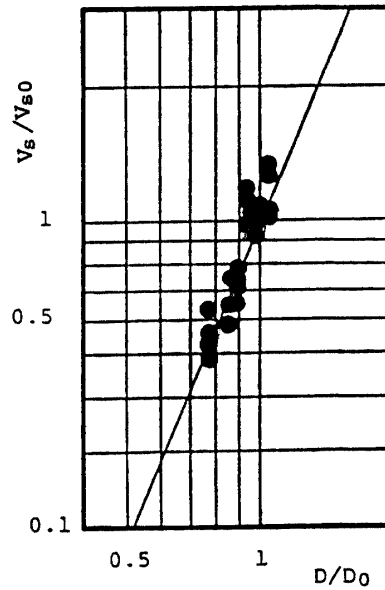


Fig. 2 The relationship between V_s/V_{s0} and D/D_0 (V_s : scored volume by raindrop)

$$\therefore n_d = \frac{\alpha_3 D^2}{\alpha_2 d^2} = \alpha_4 \frac{D^2}{d^2} \quad (12)$$

よって、穿孔表面に作用する摩擦力 F は

$$F = n_d F_d = \alpha_1 \mu_F \rho g D^3 \alpha_4 \frac{D^2}{d^2} = \alpha_5 \rho g \frac{D^5}{d^2} \quad (13)$$

この摩擦力 F が穿孔に沿う長さ l にわたって働くと考え、 l は雨滴径に比例すると仮定すると

$$E_F \propto Fl = \alpha_5 \rho g \frac{D^5}{d^2} \alpha_6 D = \alpha_7 \frac{\rho g}{d^2} D^6 \quad (14)$$

基準雨滴径による消費エネルギーを E_{F0} とすると

$$E_F = E_{F0} \cdot \eta^6 \quad (15)$$

$$\hat{\epsilon}_F = \frac{E_F}{E_D} = \frac{E_{F0} \eta^6}{E_{D0} f_E(\eta)} \quad (16)$$

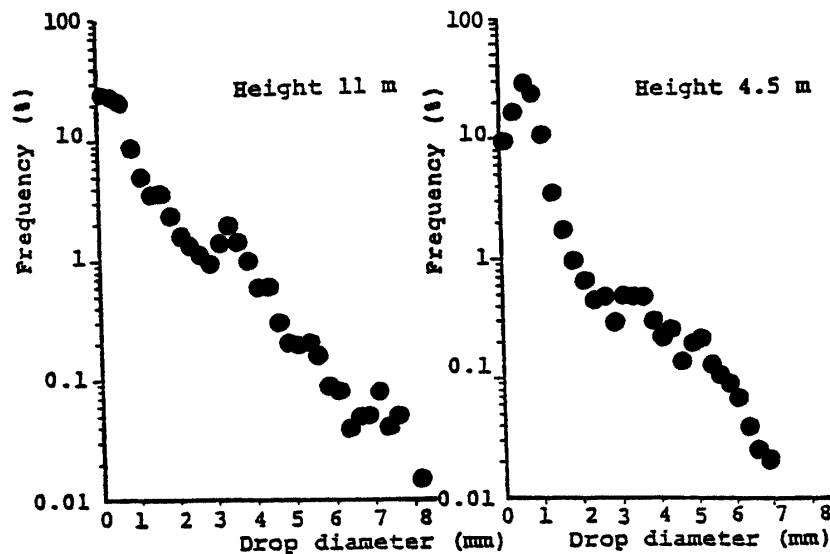


Fig. 3 The size distribution of raindrop created by rainfall simulators.

$E_{F0}/E_{D0} = \xi_{F0}$ を基準雨滴径 D_0 によるエネルギー消費率とする。よって、

$$\xi_F = \xi_{F0} \frac{\eta^6}{f_E(\eta)} \tag{17}$$

Fig. 2 に示す実験結果から、 m_S は雨滴径の 2.5 乗に比例し、また m_W は雨滴体積に比例すると考える。よって

$$m_S = m_{S0} \eta^{2.5} \tag{18}$$

$$m_W = m_{W0} \eta^3 \tag{19}$$

以上より、基準雨滴 D_0 による出射速度 v_0 と任意雨滴による出射速度 v の比率 μ は次のようになる。

$$\mu = \frac{v}{v_0} = \sqrt{\frac{E_{S+W}}{E_{S+W0}} \frac{m_{S0} + m_{W0}}{m_S + m_W}} \tag{20}$$

$$\therefore v = \mu v_0 \tag{21}$$

基準雨滴 D_0 によるエネルギー消費率 ξ_{F0} は実験的に求められていないので、 ξ_{F0} を変数としてシミュレーションを行い、 ξ_{F0} による分布密度関数への影響を調べた。

3.2 シミュレーションに用いる変数および定数

実験条件について、シミュレーションを行うにあたり次の諸変数は乱数発生により得た。

1) 任意雨滴径 D の発生

実験に用いる降雨発生装置から発生する雨滴分布をあらかじめろ紙を用いたサンプリングにより求めた結果 (Fig. 3), 落下頻度はほぼ指数分布に従うものとし、次のような密度関数をもつ指数乱数として発生させた。

$$f_D(D) = \lambda \exp(-\lambda D) \quad \lambda: 0.2 \sim 1.0 \tag{22}$$

2) エネルギー消費率 ξ_{F0} の発生

実験によって求められていないので、次の範囲で一様乱数を発生させた。

$$0 \leq \xi_{F0} \leq 1$$

また、 ξ_{F0} を上の範囲で、変化させてシミュレーション

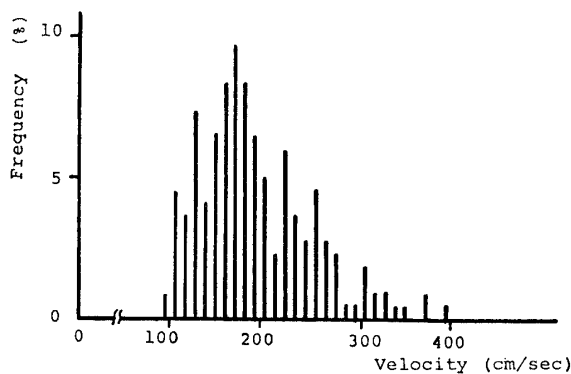


Fig. 4 The distribution of incipient velocity of the splashed soil-particle.

ンを行い、 ξ_{F0} の影響を調べた。

3) v_0 の発生

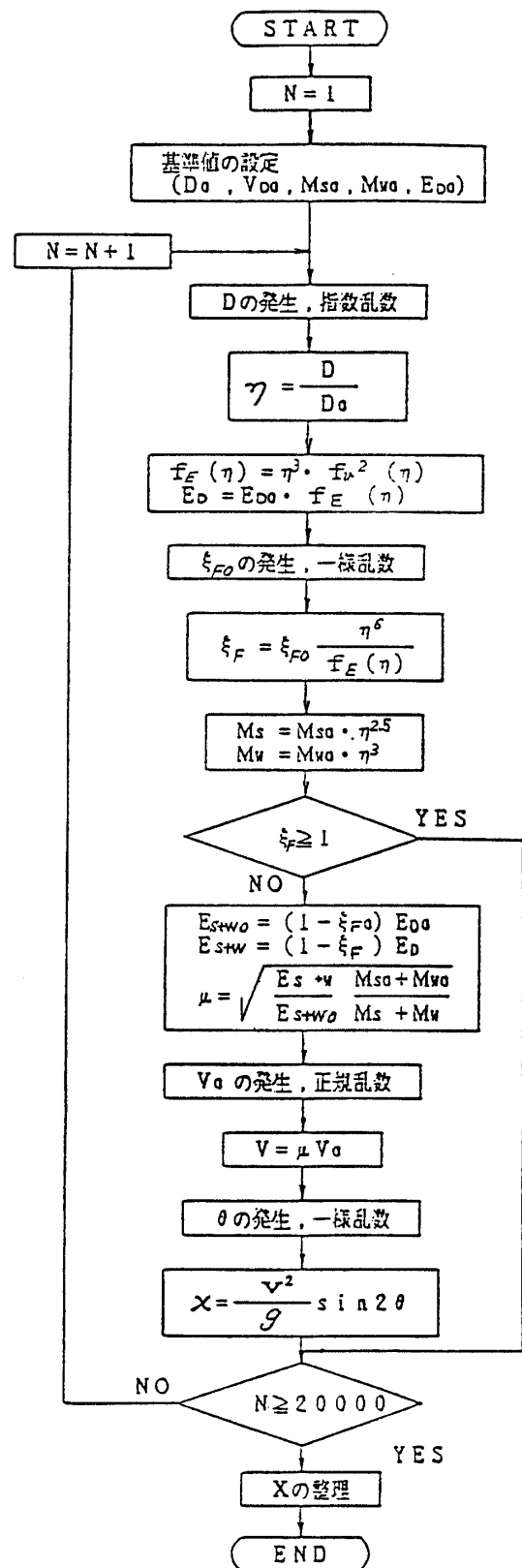


Fig. 5 Flow chart for the simulation to determine the density function.

実験により求められた関係³⁾により (Fig. 4) 正規分布に従うとして、次の平均 \bar{v} 、標準偏差 σ をもつ正規乱数を発生させた。

$$\bar{v}=205 \text{ [cm/sec]}$$

$$\sigma=55.8$$

4) θ の発生

次の範囲で一様乱数として発生させた。

$$0 \leq \theta \leq 45^\circ + \frac{\phi}{2}$$

なお、シミュレーションには次の諸定数を用いた。

$$D_0 = 0.55 \text{ [cm]} \quad E_{D_0} = 4.36 \times 10^4 \text{ [erg]}$$

$$V_{D_0} = 1000 \text{ [cm/sec]} \quad \phi = 30^\circ$$

$$m = 0.040 \text{ [g]} \quad d = 0.02 \text{ [cm]}$$

$$m_{w_0} = 0.065 \text{ [g]}$$

シミュレーションのフローチャートは Fig. 5 に示した。

なお、シミュレーションは、2万回繰り返して、任意方向の飛散土量分布を求めた。

3.3 シミュレーション結果

発生させる乱数のパラメーターを変化させ、シミュレーションを行い、任意方向の飛散土量分布を調べた結果を以下に示す。なお、確率変数は、飛散土粒子粒径 d と飛散距離 x との比 $x/d=X$ を用いて整理した。

a) Case 1

Fig. 6-a は、出射角を $0 \leq \theta \leq 60^\circ$ 、エネルギー消費率を $0 \leq \xi_{F_0} \leq 1$ の範囲で一様乱数を発生させ、雨滴落下頻度のパラメーター λ を変化させた時の結果である。 λ の減少、つまり大きい雨滴の落下頻度が多いほど分布は裾の広がったものとなった。

b) Case 2

Fig. 6-b は、 $\lambda=0.6$ とした指数乱数、出射角を $0 \leq \theta \leq 60^\circ$ の範囲で一様乱数を発生させ、 ξ_{F_0} を変化

させたときの結果である。 ξ_{F_0} の増加と共に裾の広がった分布となった。

c) Case 3

Fig. 6-c は、 $\lambda=0.6$ とした指数乱数、 $0 \leq \xi_{F_0} \leq 1$ の範囲の一様乱数とし、 θ を変化させた時の結果である。 θ が小さいほど、裾の広がった分布となった。

Case 1, Case 2, Case 3 の結果から考察すると、飛散土量分布は雨滴落下頻度の変化によって最も影響されると考えられるが、おおむねの場合も指数分布に近い分布をすると思われる。

3.4 飛散土量分布密度関数の推定

シミュレーション結果から、飛散土量分布密度関数を次式として推定した。

$$f(X) = C \cdot \exp(-BX^A) \quad (23)$$

これは、指数分布に幅を持たせたものであり、 A, B を変化させることにより、シミュレーション結果をよく近似することができる。

3.5 実験による飛散土量分布の検討

前述のシミュレーション結果より、飛散土量分布はおおむね $f(X) = C \cdot \exp(-BX^A)$ に従うと考えられ、実験を通してこのことについて検討した。

Fig. 7 に示す実験装置を用い、実験試料として粒径

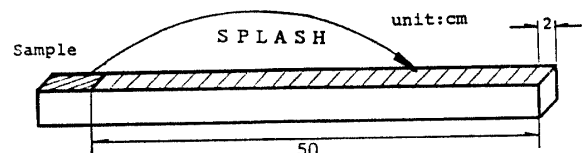


Fig. 7 Apparatus used for the measurement of the splashed-soil distribution.

$d=0.02 \text{ cm}$ の豊浦標準砂を $2 \times 5 \text{ cm}$ の斜線部に充填した。この試料に地上高さ11m、4.5mの位置にそれぞれ設置された降雨発生装置から降雨を1時間降ら

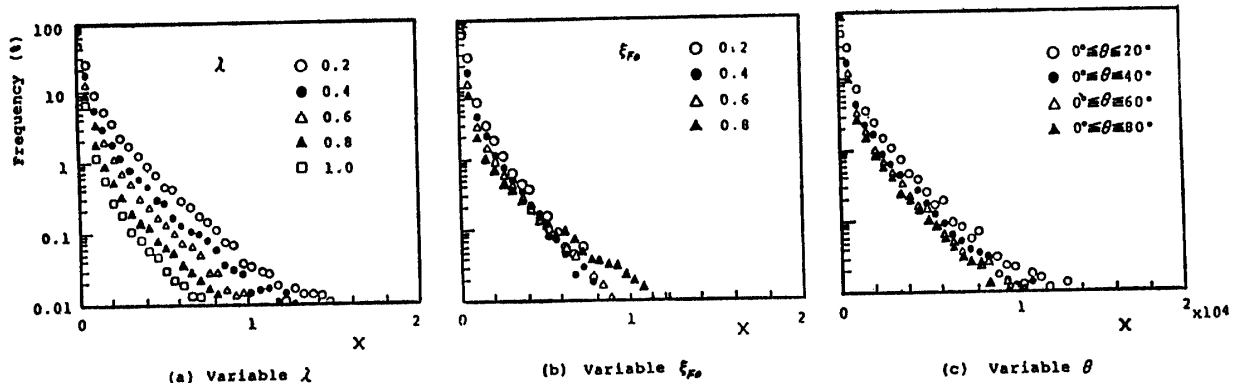


Fig. 6 Simulation results of the splashed soil distribution for three variables: λ , θ , and ξ .

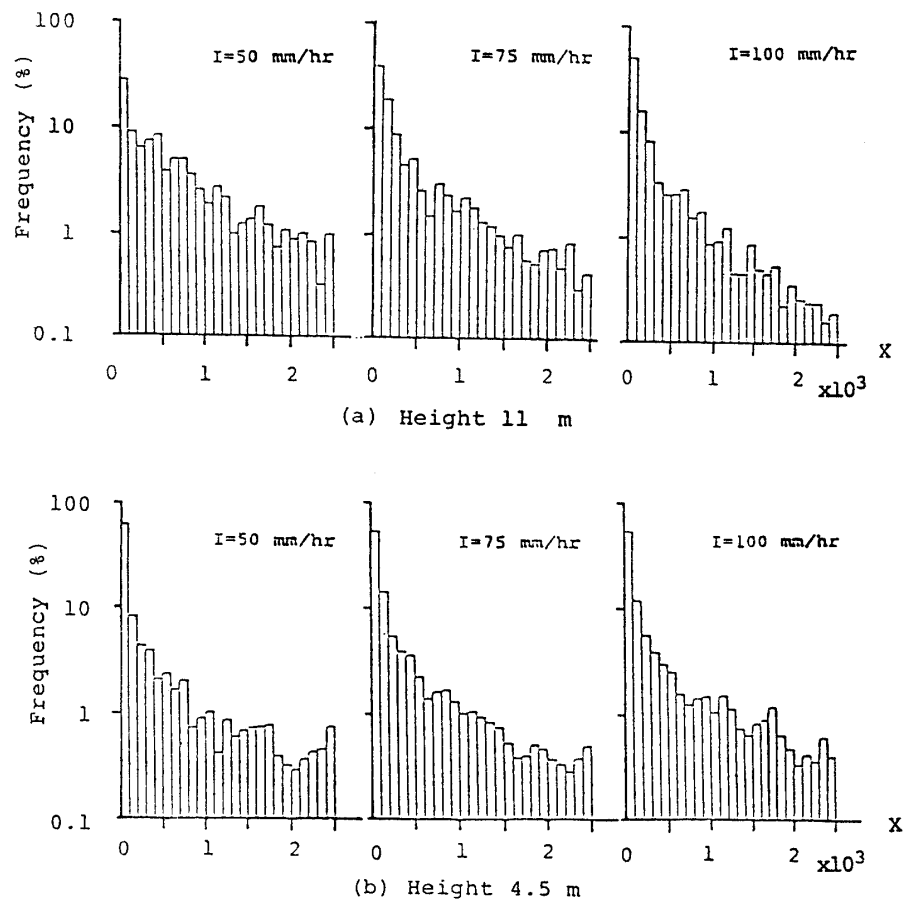


Fig. 8 Experimental results of the splashed-soil distribution for several rainfall intensities.

せ、各セクションに飛散した土粒子を採取して飛散土量を求め、降雨強度 $I=50, 75, 100 \text{ mm/hr}$ に変化させて実験を行い、飛散土量割合と飛散距離の関係を示したのが Fig. 8 である。試料を充填した面積が小さいため、飛散分布が重なり合っても実験結果に及ぼす影響は少ないと考えられ、この実験結果はおよそ実際の分布に近いと考えることができる。

実験結果は、シミュレーション結果とよく似た分布となっており、飛散土量分布の密度関数を $f(X) = C \cdot \exp(-BX^A)$ とすることは妥当であると言える。

4. 飛散土量分布密度関数のパラメーターの決定

前述の分布密度関数を用いて、飛散土量分布を決定するために以下の実験を行い、実験データに最も合致する密度関数のパラメーターを決定した。

4.1 実験方法

Fig. 9 に実験装置および概要を示した。試料を Q 土槽に充填し、この試料に11m、4.5mの高さに設置された降雨発生装置により降雨を1時間与え、Q土槽

から P 容器の各セクションに飛散した土粒子を採取した。用いたそれぞれの降雨発生装置の雨滴粒度分布

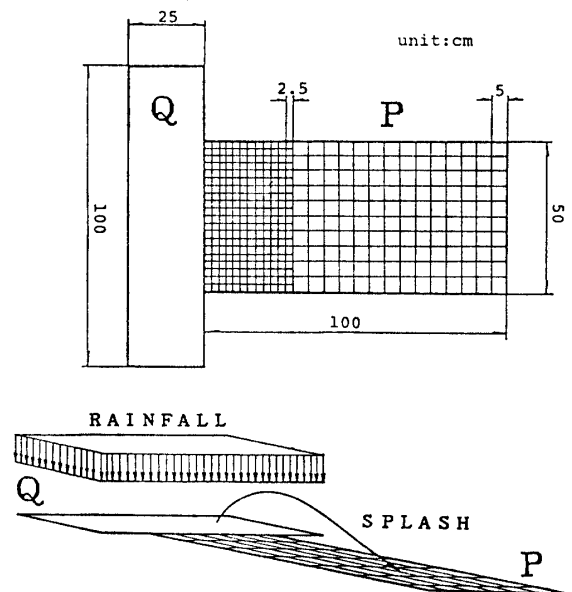


Fig. 9 Experimental apparatus used for the determination of parameter A, B in a density function.

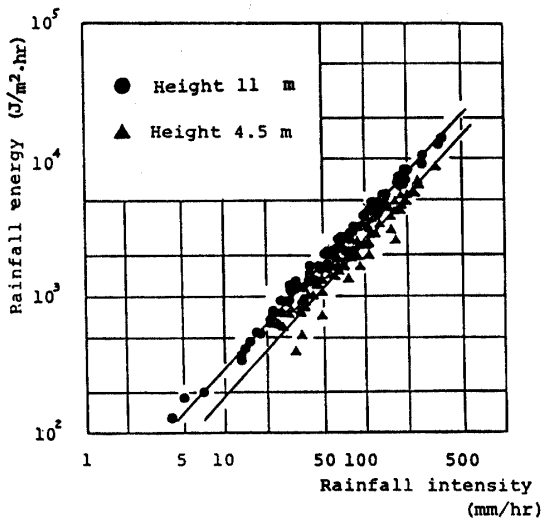


Fig. 10 The relationship between the rainfall energy and rainfall intensity.

は、前述の Fig. 3 のようであり、降雨強度と雨滴衝撃エネルギーの関係を Fig. 10 に示した。また、実験試料は粒径 $d=0.02$ cm の豊浦標準砂を用いた。実験はそれぞれの降雨装置を用いて、降雨強度を変えて計 9 回行った。

4.2 実験および解析結果

実験結果の例を Fig. 11 に示した。縦軸には、全飛散土量に対する各セクションに飛散した土量の割合を示している。各セクションの飛散土量は、 Q 土槽の各地点からの飛散土粒子が重複したものであり、各セクションの飛散土量から前述の密度関数のパラメーター、および単位面積からの飛散土量を以下の解析により求めた。

4.2.1 パラメーター A, B の決定

Q 土槽の各地点から任意の方向へ飛散する土量が、

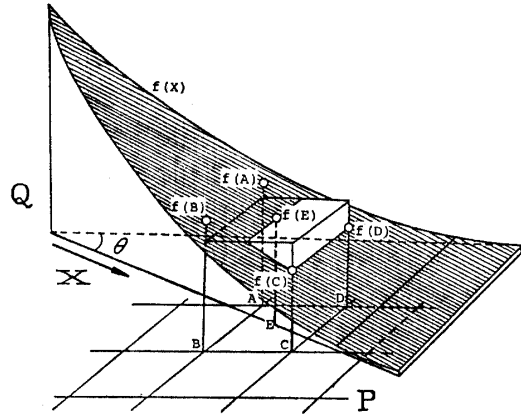


Fig. 12 Illustration of the model system used for the simulation calculation.

密度関数 $f(X)$ に従うと仮定すると、 Q 土槽のある地点から P 容器の各セクションに飛散する土量は、 Q 土槽のある地点を中心として、密度関数 $f(X)$ が P 容器上を回転したときに求まる各セクション内における確率体積である (Fig. 12 参照)。解析では、各セクションの区分線上の点および中心の点 A, B, C, D, E の各点上を通過するときの密度関数値を平均し、そのセクションの面積をかけて確率体積を近似的に求めた。 Q 土槽を 2.5×2.5 cm の 400 区分に分割し、各区分について同様の操作を行い、各セクションにおける確率体積を求め、総計して Q 土槽全域からの各セクションへの確率体積とし、パラメーター A, B を仮定したときの分布を求めた。以上のようにして、各セクションについての全確率体積に対する割合を密度関数のパラメーター A, B を変化させて求め、実験データの各セクションについての飛散土量割合と比較し、最も適合するパラメーターを決定した。

最適パラメーターを求める際、仮定した分布と実験データによる分布との誤差について次の条件により

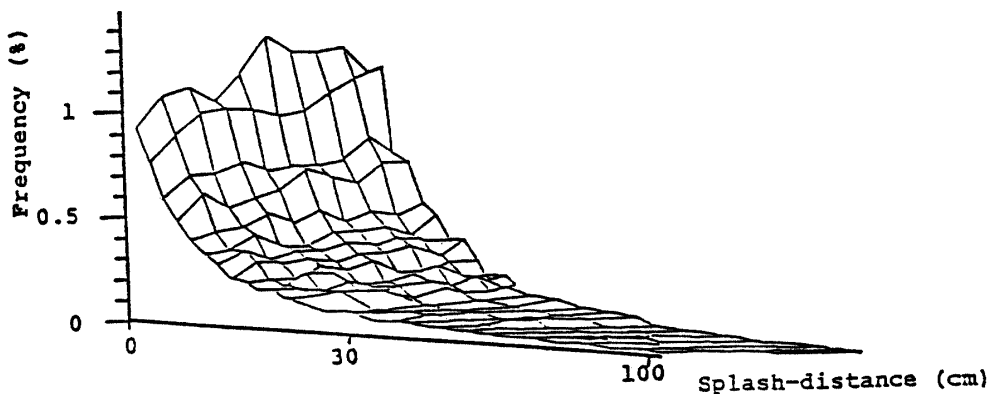


Fig. 11 Three-dimensional-illustration of the experimental result of the splashed-soil distribution.

検討した。

- (1) 各セクションにおける誤差の絶対値の総計
- (2) 全セクションにおける誤差の最大値
- (3) 各セクション間の変化率誤差の総計
- (4) P 容器端のセクションにおける誤差

各条件について最も誤差の少ない場合のパラメーター A, B の値を求め、これを最適値とした。

4.2.2 解析結果

各実験について決定された密度関数の最適パラメーター A, B の値と、実験時の降雨エネルギー強度との関係を Fig. 13, 14 に示した。降雨エネルギー強度は、単位面積単位時間当りの雨滴落下衝撃エネルギーであり、Fig. 10 の関係により求めた。

パラメーター A は、降雨エネルギー強度が高くなると減少する傾向があり、パラメーター B はほぼ一定値を示した。

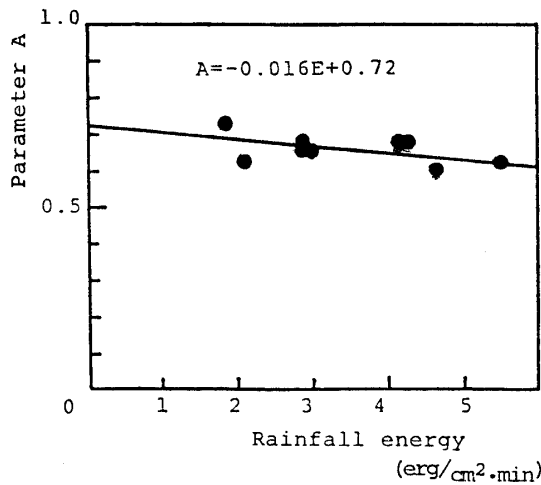


Fig. 13 The relationship between parameter A and rainfall energy.

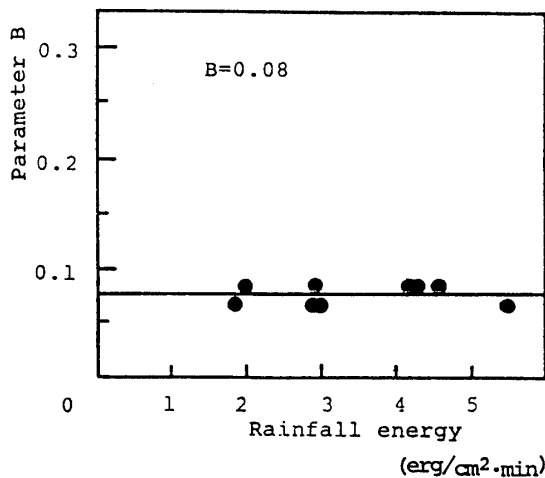


Fig. 14 The relationship between parameter B and rainfall energy.

4.2.3 単位面積当りの飛散土量算定

以上のようにして決定した最適パラメーター A, B をもつ密度関数 $f(X)$ を用いて、単位面積当りの飛散土量を求めた。

実験値と最も適合した仮定分布による全確率体積は比例係数と考えられるから、この全確率体積に単位面積当りの飛散土量をかければ、実験により求められた全飛散土量となる。最適パラメーター A, B を用いた密度関数の全方向についての積分値 (Fig. 12 参照) を

$$F = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f(X) dX d\theta \quad (24)$$

とすると、仮定分布による飛散土量と実験で求められた飛散土量の関係は次のように表わせる。

$$SP = SP_{unit} \times \frac{Q}{\sum \left(\frac{P}{F} f(X) \Delta P \right) \Delta Q} \quad (25)$$

ここで、

SP : 全飛散土量

SP_{unit} : 単位面積当りの飛散土量

ΔP : 飛散土量の入る各セクションの面積

ΔQ : 飛散土量の飛び出す各セクションの面積

よって

$$SP_{unit} = \frac{SP}{\sum \left(\frac{P}{F} f(X) \Delta P \right) \Delta Q} \quad (25)'$$

(25)' 式によりパラメーター A, B についての SP_{unit} の飛散土量を求めることができる。各実験から求めた SP_{unit} と降雨エネルギー強度との関係を Fig. 15 に示した。降雨エネルギー強度の増加につれて、SP_{unit} は増加している。なお、Fig. 13, 14, 15 の結果について代表する直線を求め図中に示した。

ただし、

E : 降雨エネルギー強度 [erg/cm²·min]

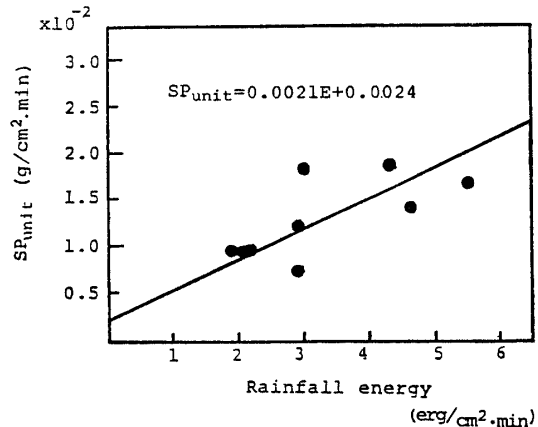


Fig. 15 The relationship between the amount of splashed-soil from unit area (SP_{unit}) and rainfall energy.

5. 実測値との検討

求めた降雨エネルギー強度と A , B , SP_{unit} との関係を用いて、実測値との比較を行った。実験は、直径 14 cm の小皿に豊浦標準砂を充填し、これに降雨発生装置により降雨をその強度を変えて与えて、飛散土量を測定した。実験時の降雨エネルギー強度と A , B , SP_{unit} との関係により推定値を求め、実測値との比較を Fig. 16 に示した。降雨エネルギーと A , B , SP_{unit} との関係を求めたデータが不足しているため、推定値と実測値にバラツキが見られる。

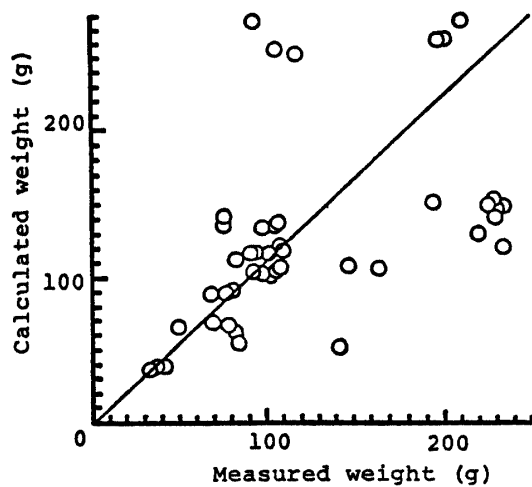


Fig. 16 Comparison of the calculated weight of splashed-soil with the measured weight.

6. むすび

土壌侵食現象において重要な要因である飛散作用に

ついて、飛散土量分布を求める基礎実験および解析方法を示した。また、シミュレーションにより求めた飛散土量分布密度関数型の数学的根拠および適合性は不明であるが、この解析方法は有効かつ汎用性のあるものと考えられる。本論を要約すると次のようである。

(1) 飛散土量分布を基礎データを用いシミュレーションを行った結果、分布は次の密度関数型に従うことがわかった。

$$f(X) = C \cdot \exp(-BX^A)$$

(2) 求められた密度関数を用い、実験を通して各パラメーターを決定し、決定したパラメーターを用いて単位面積当りの飛散土量を求めた。

(3) 得られた降雨エネルギー強度とパラメーター A , B , および単位面積当りの飛散土量との関係を用いて求めた推定値と実測値の比較は、必ずしも良好な結果ではなく、今後さらに多くの実験を行う必要がある。

終りに、本研究に御協力いただいた河元信幸、松永義秀の両氏に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) L.D. Meyer, W.H. Wischmeier: Mathematical Simulation of the Process of Soil Erosion by water, Trans. ASAE (1969)
- (2) 南信弘: 有限斜面における雨滴土壌侵食の理論的研究, 高知大学学術報告第28巻 (1979)
- (3) 完山聖泰: 落水水滴の飛散時におけるエネルギー消費率に関する研究, 山口大学学士論文 (1979)

(昭和59年4月16日受理)