

人工降雨装置による斜面侵食に関する研究(Ⅶ)
一水滴による飛散実験との関係

井上章二*

Experimental Studies on Soil Erosion Using Simulated
Rainfall(VII)

Relation between Soil Erosion by Rainfall and Soil
Splash by a Water-drop

Shoji INOUE

Summary : In order to make clear the relation between the soil splash and the surface erosion of slope, some experiments on soil splash by a water-drop and on surface erosion of slope by simulated rainfall were carried out. In these experiments, soil material was coastal sand which was sifted into five varieties of grain-size distribution.

The results may be summarized as follows :

- 1 . The correlation between the depth of hole eroded by a water-drop and the soil particle size was significant.
- 2 . The maximum moved distance of soil particles splashed by a water-drop increased as the soil particle size decreased. But the correlation between the soil particle size and average moved distance was not significant.
- 3 . In the condition of same water-drop size, the weight of particles splashed by a water-drop was constant regardless of the soil particle size.
- 4 . As a result of experiments on surface erosion of slope by simulated rainfall, sediment yield increased as the soil particle size decreased.
- 5 . The inferior limit of the diameter of water-drops which could splash a soil particle depended on the soil particle size. Therefore, the magnitude of raindrop impact per unit time which was taken part in the soil splash was different according to the soil particle size in spite of the condition of same rainfall intensity.

* 森林工学研究室 Laboratory of Forest Engineering

要旨 本研究では、一水滴による飛散と連続降雨によるノリ面全体の侵食との関係を解明するため、フルイ分けによって粒径を調整した5種類の海岸砂をもちいて飛散実験およびノリ面侵食実験を行なった。得られた結果を要約すれば以下のようである。

- 1) 一水滴による飛散実験において、砂の粒径が大きくなるほど侵食孔の深さが大きくなる。しかし、侵食孔の径、侵食体積等と、砂の粒径、水滴径との間に一定の傾向は認められない。
- 2) 最大飛散距離は砂の粒径が小さいほど大きくなるが、粒径が小さい場合には水滴落下地点付近に飛散粒子が集中するため、平均飛散距離は粒径の大きさに対して一定の傾向は示していない。
- 3) 水滴の径が同じであれば、砂の粒径の大小にかかわらず、一水滴による飛散粒子の総重量は一定となる。
- 4) ノリ面侵食における流出土砂量は粒径が小さいほど多い。
- 5) ある粒径の粒子に対して、それを飛散させることができる水滴の径の最小値が存在する。そのため、連続降雨の場合、降雨強度が同じであっても土の粒径が異なれば、実際に粒子の飛散ならびに流出に関与する雨滴衝撃の大きさは異なる。

I はじめに

ノリ面の表面侵食における土砂の移動・流出の形態には、雨滴衝撃力によるもの、地表流下水の掃流力によるもの、雨滴衝撃力と掃流力両者の相互作用によるもの等が考えられ、表面侵食機構を解明するためには、それらの土砂移動形態それぞれの機構を明らかにする必要がある。これまでの研究²⁾において、侵食土砂量と10分間最大降雨強度との間に強い相関関係があることを見出し、表面侵食には短時間の降雨強度の影響が大きいことを明らかにした。また、最近では、表面侵食においては雨滴衝撃力が支配的な因子であるとする報告¹⁾もあり、一水滴による土壌飛散に関する実験も数多く実施されているようである。しかしながら、それらの一水滴の衝撃力に関する研究結果が、連続降雨の場合のノリ面全体の侵食とどのように対応するのかということについてはほとんど明らかにされていない。そこで本研究では、この点に焦点をしぼり、一水滴による土粒子飛散実験と人工降雨装置を利用した連続降雨によるノリ面侵食実験とを行ない、検討を加えた。

本研究の実施にあたり、ご指導、ご助言、ご協力を賜っている九州大学、末 勝海名誉教授をはじめ農学部砂防工学研究室の方々、愛媛大学農学部、伏見知道教授、小川 滋助教授、江崎次夫助手に対し深謝の意を表す。また、実験にあたっては、愛媛大学演習林、藤久正文、尾上清利、河野修一各技官の方々、ならびに森林工学研究室専攻生、北村彰秀、新田勝彦両君にご協力をいただいた。ここに記して深謝の意を表す。

なお、本報告の一部は、第95回日本林学会大会（東京）において発表した。

II 実験方法

1. 一水滴による土粒子飛散実験

一水滴による飛散現象と連続降雨によるノリ面全体の侵食との関係を明らかにするためには、それぞれの実験条件を可能な限り対応づけておくことが望ましい。その条件とは、飛散実験にもちいる水滴の径は連続降雨の場合の雨滴径分布の範囲内であること、落下速度は両者とも終末落下速度に達していること、供試土は同じものをもちいることなどが挙げられる。したがって、本研究においてはそれらを充分考慮して実験を行なった。

まず、水滴に関しては、一定の径の水滴を安定して落下させることができるように、医療用の点滴装置を利用して水滴を発生させた。内径の異なる注射針を取り換えることによって水滴の大きさを変化させ、水滴を完全なる球体とみなしてその重量より直径を算定した。飛散実験に使用したのは、直径3.426mm, 3.030mm, 2.725mmの3種類の径の水滴である。なおこれらの水滴径の値は60滴の水滴の平均値である。また、水滴が地上12mの高さより落下するように点滴装置を設置しており、Laws³⁾の実験結果から判断すれば、水滴は終末落下速度に達しているものと考えられる。

次に、供試土としては愛媛県松前町、重信川河口付近の海岸砂をもちい、それをフルイ分けして、5種類の粒径の異なる試料を準備した。それぞれの試料は若干の粒径の広がりには有するが、その範囲が狭いこともあり、取り扱

い上均一粒径とみなして、各試料の粒径の中央値をもって代表値とした。その値は、0.20mm, 0.335mm, 0.505mm, 0.715mm, 1.125mmである。実験に海岸砂をもちいた理由には次の二つが挙げられる。第一に、実験範囲では、小粒径から大粒径まで比較的一様な形状をしており、マサ土などに比べて粒子が破壊しにくい。第二に、連続降雨によるノリ面侵食実験を行なう際に、透水性がよく表面流の発生を抑制でき、雨滴衝撃力の影響について検討する上で効果的であるということである。

この試料を内径約5cm, 容積100cm³の土壌採取円筒に充てんし、水平に設置する。土壌面と同じ高さにベニヤ板で水平面を作り、それに60cm×60cmのろ紙を敷きつめて飛散粒子を計測できるようにした。また、試料は風乾状態のものと飽和状態のものの2種類をもちいた。

上記のように、3種類の径の水滴と5種類の径の砂をもちい、さらに砂の含水状態を変化させ、それらの条件の組合せと同一条件での反復実験により、合計78回の飛散実験を行なった。水滴落下地点付近の砂表面変形形状は、1/100mm読みのカセットメーターで計測し、飛散した粒子の個数と水滴落下地点からの水平移動距離を測定した。

2. 連続降雨によるノリ面侵食実験

この実験には、雨滴径分布等の降雨特性が明らかにされ、愛媛大学演習林米野々森林研究センターに設置されている人工降雨装置³⁾をもちいた。この人工降雨装置では、雨滴は実験ノリ面上方約11.5mから落下するようになっているため、飛散実験の場合と同様、雨滴は終末落下速度に達しているものと判断される。

実験ノリ面は、斜面長150cm, 幅30cm, 土層の深さは15cmであり、斜面こう配は30°で一定とした。供試土は一水滴による飛散実験に使用したのと同じ海岸砂であり、フルイ分けにより粒径の条件も等しくした。ただし、飛散実験のときの最小粒径である0.20mmを徐く4種類の粒径の試料について実験を行なった。降雨強度はすべて90mm/hr, 降雨時間は1時間とし、流出土砂はノリ面下端より流出したものの乾燥重量を測定したが、実験開始より最初の10分間は1分ごとに、それ以後は5分ごとに計測した。

III 結果と考察

1. 飛散実験における砂表面変形形状

水滴落下地点付近の砂表面の変形形状は図-1に示すように二つのタイプに分けられる。それぞれ、図中に示す

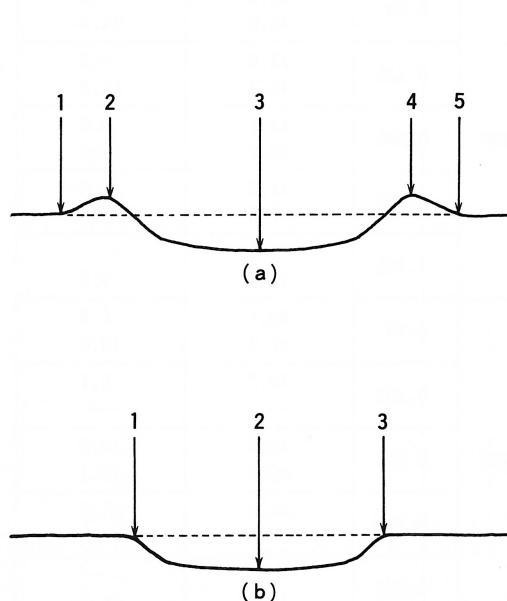


図-1 砂表面の変形形状と計測位置

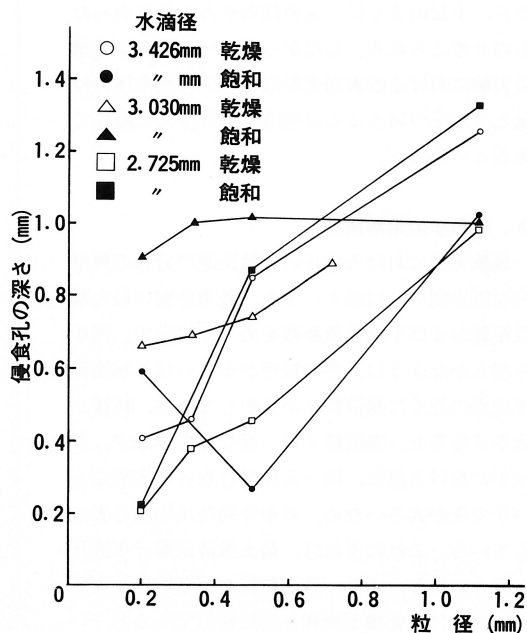


図-2 粒径と侵食孔の深さとの関係

番号位置で水平距離と高さを計測し、その値から侵食孔の径、侵食深、侵食体積、盛上り部の高さおよび体積等を求めた。図-1の(a)タイプのように、盛上り部を形成するのは、ほとんどが砂を飽和させて行なった実験の場合であった。

砂の粒径と侵食孔の深さとの関係を図-2に示す。飽和の場合に逆転している例もあるが、砂の粒径が大きくなるほど侵食深も大きくなる傾向を示している。これは、粒径が大きければ、一つの粒子が飛散ただけでも大きくほみが生じることから説明できよう。砂の粒径と盛上り部の高さとの関係においても、バラツキは多いが同様の傾向を示している。しかしながら、侵食孔の径、侵食体積、盛上り部の体積については、砂の粒径および水滴径との間に一定の傾向を見出すことはできなかった。江崎¹⁾は侵食体積等は土壤の締固めの程度に影響されると報告しているが、今回の実験では、海岸砂をもちいたこともあり、また、砂を入れた容器が小さいこともあってほとんど締固めはできず、単位体積重量から判断すれば、各実験ほぼ均等な砂の詰り具合となっていた。さらに、一水滴による飛散という現象は、力の作用時間が極めて短く、力の作用する範囲も狭い現象であるため、各実験での水滴の落下位置付近の砂粒子の配列状態等によって、非常にバラツキの大きな確率的要素の高い現象であると推察されることから、上記のように一定の傾向がみられなかったものと考えられる。したがって、一水滴による飛散実験における砂表面変形状とノリ面全体の侵食とを対応づけることは現時点では非常に困難であるといえよう。

2. 砂粒子の飛散距離

飛散実験における粒子の飛散距離の分布の典型的な例を図-3に示す。また、各条件別の最大飛散距離および平均飛散距離を表-1に示す。図から明らかなように、砂の粒径が小さいほど水滴落下地点の近くに飛散粒子が集中しており、粒径が大きくなると、飛散粒子は一様な分布を示す。表-1における値は、同一条件で行なった実験でもバラツキが大きいため、各条件別に平均値で表示している。これによれば、最大飛散距離は水滴径が大きいほど、また、砂の粒径が小さいほど大きい。さらに、乾燥と飽和とを比較してみると、い

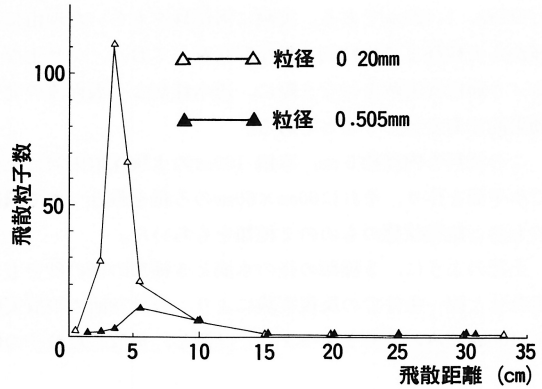


図-3 飛散距離のヒストグラム (一例)

表-1 最大飛散距離と平均飛散距離

水滴径	砂粒径	最大飛散距離	平均飛散距離
3.426	0.20	40.7	5.7
		66.3	17.8
	0.335	37.8	8.3
	0.505	26.2	6.2
		35.9	16.2
3.030	0.20	5.4	3.8
		3.6	3.4
	0.335	4.1	4.1
		35.0	4.8
	0.505	45.0	14.9
14.6		4.3	
2.725	0.335	43.7	13.2
		13.1	5.5
	0.505	32.9	12.6
		11.6	7.0
	0.715	27.6	11.4
1.125		—	—
2.725	0.20	21.8	9.5
		26.1	5.3
	0.335	37.5	13.0
		19.7	6.1
	0.505	—	—
15.9		10.8	
0.715	26.0	15.1	
	21.3	21.3	
1.125	—	—	
	10.2	10.2	

最大飛散距離、平均飛散距離欄の上段、下段はそれぞれ乾燥状態および飽和状態における実験値を示す。

ずれも飽和状態の方が最大飛散距離は大きいようである。しかし、平均飛散距離の場合はこのような一定の傾向は示していない。これは、図-3に示されるように、粒子の飛散距離の分布形が粒径によって著しく異なるということに起因しており、飛散距離とノリ面侵食における流出土砂量とを関連づけるためには、後述する飛散粒子数との関係を把握したうえで検討する必要があるだろう。

3. 砂の粒径と飛散粒子数との関係

図-4は、砂の粒径と飛散粒子数との関係を両対数でプロットしたものである。同一条件の実験においても、バラツキが大きいものもあるが、いずれの条件においても非常に強い相関関係が認められる。ここで、 $N = a \cdot d^b$ とおき、各条件別に両辺の対数をとって回帰分析を行なった結果は以下のようである。ただし、 d は砂の粒径、 N は飛散粒子数、 a および b は回帰係数である。

$D = 3.426\text{mm}$

乾燥 $N = 1.58d^{-3.40}$ ($r = -0.903^{***}$)

飽和 $N = 2.51d^{-3.25}$ ($r = -0.979^{**}$)

$D = 3.030\text{mm}$

乾燥 $N = 0.73d^{-3.76}$ ($r = -0.956^{***}$)

飽和 $N = 2.17d^{-3.28}$ ($r = -0.979^{***}$)

$D = 2.725\text{mm}$

乾燥 $N = 0.40d^{-3.54}$ ($r = -0.948^{***}$)

飽和 $N = 1.53d^{-2.60}$ ($r = -0.987^{***}$)

(D は水滴径、 r は相関係数、**および***はそれぞれ有意水準が99%レベル、99.9%レベルであることを示す)

以上の結果より、多少のバラツキはあるものの、飛散粒子数は粒径の約-3乗に比例しているといえることができる。すなわち、

$$N = a \cdot d^{-3} \quad \dots\dots\dots(1)$$

と表わせる。ただし、次元的に考えると係数 a は長さの3乗の次元を有することになる。

ところで、飛散粒子1個の重量を m とし、粒子を完全な球体とみなし、砂の単位体積重量を σ とすれば、

$$m = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3 \cdot \sigma \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。したがって、一水滴による飛散粒子の全重量(M)は、

$$\begin{aligned} M &= m \cdot N \\ &= \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot a \cdot \sigma \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

となり、砂の粒径(d)とは無関係ということになる。このことは、水滴径が等しい場合に飛散が生じれば

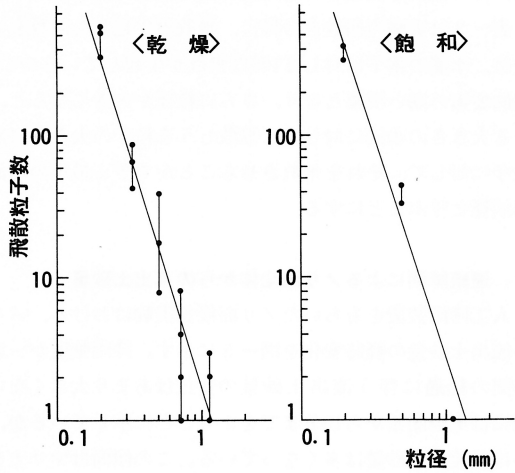


図-4-1 粒径と飛散粒子数との関係(水滴径：3.426mm)

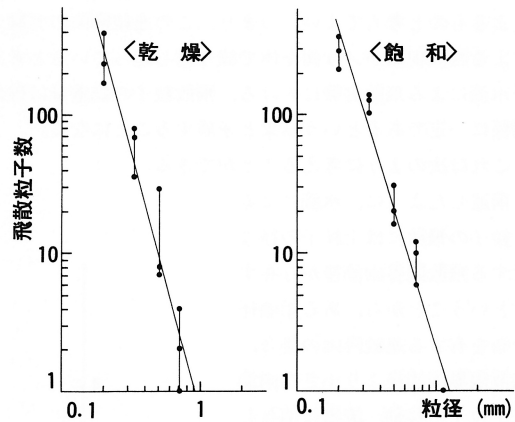


図-4-2 粒径と飛散粒子数との関係(水滴径：3.030mm)

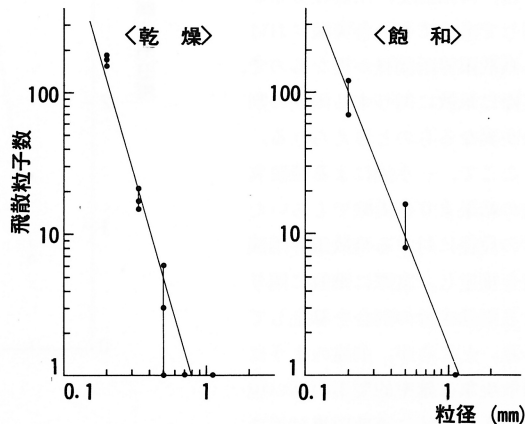


図-4-3 粒径と飛散粒子数との関係(水滴径：2.725mm)

ば、その飛散した粒子の総重量は砂の粒径に関係なく一定になるということを意味している。

表－2は実験の回数を分母に、飛散の生じた回数を分子にとって表示したものである。粒径 0.505mm以下の場合は、水滴の落下に対して100%飛散が生起しているのに対し、0.715mm以上になると、飛散しない場合が生じ、確率的要素の高い現象となり、さらに粒径が大きくなると、飛散がまったく生起しなくなるようである。すなわち、ある大きさの水滴に対して、飛散しうる粒子の大きさに限界があるということになり、換言すれば、ある大きさの粒子に対して、それを飛散させることができる最小の水滴が存在するということである。これをここでは飛散限界雨滴径と呼ぶことにする。

表－2 条件別の実験回数と飛散生起回数

砂粒径 (mm)	水滴径 (mm)		
	3.426	3.030	2.725
0.20	3 / 3 2 / 2	3 / 3 3 / 3	3 / 3 2 / 2
0.335	3 / 3 ——	3 / 3 3 / 3	3 / 3 ——
0.505	3 / 3 2 / 2	3 / 3 3 / 3	3 / 3 2 / 2
0.715	4 / 7 ——	3 / 3 3 / 3	1 / 2 ——
1.125	3 / 5 1 / 4	0 / 1 3 / 3	1 / 4 1 / 2

上段は乾燥状態、下段は飽和状態を示す

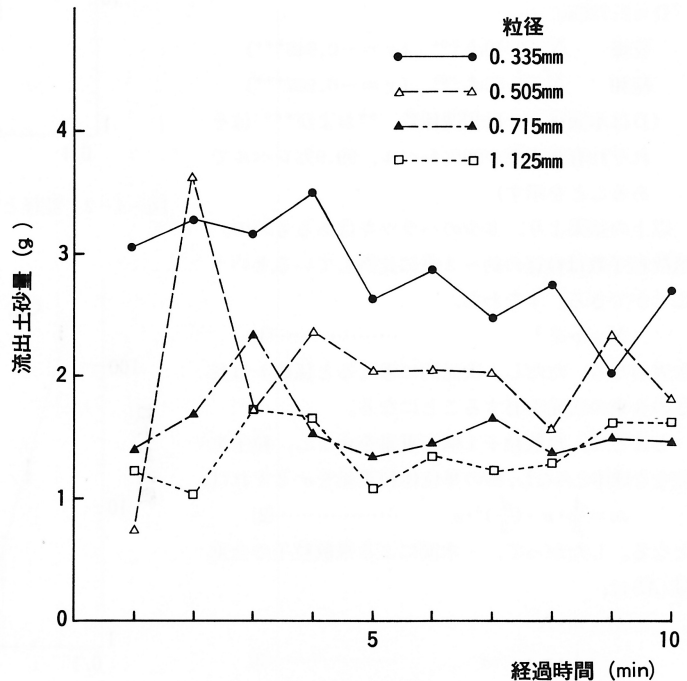
4. 連続降雨によるノリ面全体からの流出土砂量

人工降雨装置をもちいたノリ面侵食実験における、ノリ面下端からの流出土砂量の経時変化を図－5に示す。降雨強度が一定であるため、時間の経過に伴う流出土砂量の変化はあまり大きくないので、この図には実験開始から10分までを1分ごとに示しているが、粒径が小さいほど流出土砂量は多くなっている。この傾向はマサ土をもちいて行なったこれまでの実験結果⁹⁾と一致している。また、この実験では、海岸砂をもちいたこともあり、浸透水の排水を充分に行なっていることもあって表面流は発生せず、ここでいう流出土砂はすべて雨滴衝撃力によるものと考えてよい。つまり、この連続降雨の実験では、一水滴による飛散現象がノリ面全体で繰り返し起っていると考えられるが、一水滴による飛散実験における、飛散粒子の総重量は砂の粒径とは無関係に一定であるという結果と矛盾することになる。

これは次のように考えることができる。

前述したように、水滴による土粒子の飛散には土粒子の径に対する飛散限界雨滴径が存在するということから、ある雨滴径分布を有する連続降雨の場合、飛散限界雨滴径より小さな雨滴は土粒子の移動、流出に関与しないことになる。つまり、今回のように均一粒径における実験では、降雨強度、雨滴径分布が同じであっても、各実験における飛散限界雨滴径が異なるので、実際に飛散に関与する雨滴の割合が異なるものと考えられる。

ここで、一水滴による飛散実験の結果より各実験でもちいた砂の粒径に対する飛散限界雨滴径を推定し、実際に飛散に関与する雨滴成分の割合を算定してみる。ところが、前述のように飛散現象は確率的要素の高い現象であり、特に飛散限界付近ではその傾向が顕著になる。した



図－5 流出土砂量の経時変化

がって、飛散限界雨滴径は、現象的には限界値としてよりもある幅をもった限界域として現われることになり、今回の実験から正確な飛散限界雨滴径を求めることは困難である。そこでここでは、上述の飛散限界域を目安として、非常にラフではあるが一つの推定方法を示すことにする。

まず第一段階として、飛散実験にもちいた3種類の大きさの水滴に対する飛散限界の砂粒径を推定する。本来、飛散限界というのは飛散粒子が0となるときを指すものであるが、前述の粒径と飛散粒子数との関係からも明らかのように、飛散粒子が0となるときの粒径を推定することはできないので、飛散粒子数が1となるときをもって飛散限界と仮定する。また、連続降雨によるノリ面侵食との対応を考えると、乾燥状態よりも飽和状態で行なった飛散実験の方が、現象的により近いと判断される。そこで、粒径と飛散粒子数との関係の中で示した回帰式の中で、飽和状態について、 $N = 1$ を代入すれば飛散限界の粒径の推定値が求められることになる。その値は、水滴径3.426mm, 3.030mm, 2.725mmに対して、それぞれ1.388mm, 1.260mm, 1.128mmとなった。

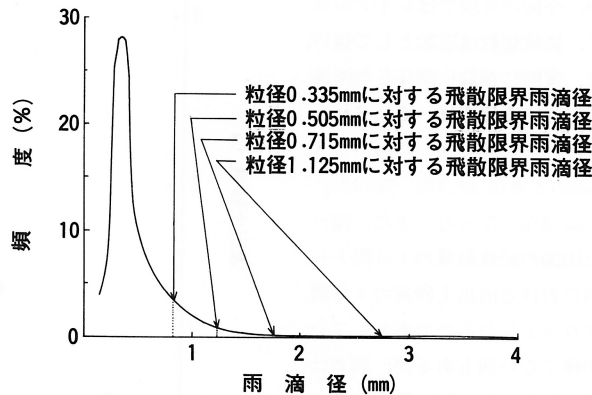


図-6 雨 滴 径 分 布

次に、この飛散限界の粒径から各実験にもちいた砂の粒径に対する飛散限界雨滴径を算定するわけであるが、水滴径と飛散限界の粒径との間に一定の関係があるのではないかと考え、両者の比をとってみると、水滴径が3.426mmのときは2.47、3.030mmのときは2.40、2.725mmのときは2.42とほぼ近似した値となり、平均値は2.43であった。

2.725mmよりも小さな水滴での実験が行なわれていないので、この比が小さな水滴の場合においても同様の値となるかどうかは疑問に残るところであるが、この値をもちいて、砂の各粒径値0.335mm, 0.505mm, 0.715mm, 1.125mmから飛散限界雨滴径を求めると、それぞれ0.814mm, 1.227mm, 1.737mm, 2.734mmとなる。この飛散限界雨滴径の値については、今後、小さな水滴による飛散実験のデータをとって確認する必要がある。また、一水滴による飛散の機構が物理的に解明されていく中で、より正確な値が理論的にも算出されてくるであろう。

図-6は今回の実験に使用した人工降雨装置の雨滴径分布を示したものであり、三原⁶⁾が測定した自然降雨の雨滴径分布と非常によく近似している。各実験でもちいた砂の粒径に対する飛散限界雨滴径を矢印で示しているが、飛散に関与する雨滴成分は雨滴数で比較すると予想外に少ないように思われる。そこで、実際に飛散に関与した雨滴成分、すなわち、飛散限界雨滴径以上の雨滴に関して、その重量および衝撃の大きさについて検討する。

雨滴による土粒子の飛散は、外力である雨滴衝撃力の作用時間が極めて短い現象であることから、雨滴の衝撃の大きさを論じるときには、衝撃力そのものよりも衝撃力にその作用時間を乗じた力積を考慮する必要がある。また、力積は力の作用時間内の運動量の変化量に等しいので、質量と速度との相乗積である運動量を求めればよいことになる。

一雨滴の衝撃力を F 、衝撃力の作用時間を Δt 、水の密度を ρ 、一雨滴の質量を m_0 、雨滴の落下速度を v とすれば、運動量(P)は、

$$\begin{aligned}
 P &= m_0 \cdot v (= F \cdot \Delta t) \\
 &= \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \rho \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^3 \cdot v \\
 &= \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot \rho \cdot D^3 \cdot v \quad \dots\dots\dots(4)
 \end{aligned}$$

となる。また、雨滴の終末落下速度(v_0)は、空気と密度を ρ' 、抵抗係数を C_D 、重力の加速度を g とすれば、

$$v_0 = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g}{C_D} \cdot \frac{\rho - \rho'}{\rho'} \cdot D} \quad \dots\dots\dots(5)$$

と表わせる。

この終末落下速度 v_0 を(4)式の v に代入すれば一雨滴のもつ運動量が求められることになる。これを飛散限界雨滴径以上の雨滴に適用すれば、実際に飛散に参与した雨滴成分の総運動量が得られる。この計算を実施するにあたって、式中の定数には以下の値をもちいた。水の密度は $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ 、空気の密度は $\rho' = 1.247 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 、重力の加速度は $g = 980 \text{ cm/s}^2$ で、抵抗係数 C_D はレイノルズ数の関数であり、レイノルズ数の値の範囲に応じて種々の関数形が与えられているが、今回の実験ではレイノルズ数にほとんど差がないので、抵抗係数は定数として扱い、 $C_D = 0.4$ とした。その結果、実際に飛散に参与した雨滴の重量および運動量の全体に対する比率は、それぞれ、砂粒径 0.335 mm のときに 81.9% 、 91.9% 、 0.505 mm のときに 78.3% 、 81.8% 、 0.715 mm のときに 57.7% 、 70.9% 、 1.125 mm のときに 21.2% 、 32.3% となった。また、図-7は横軸に飛散に参与した雨滴の総運動量の1分間トータルをとり、縦軸に各実験における流出土砂量の1分間平均値をとって両対数でプロットしたものである。プロット数が4点しかなく、明確でない面もあるが、両者は対数值ではほぼ直線関係が成立しており、同一降雨強度であっても飛散に参与する雨滴衝撃の大きさが異なるために、ノリ面からの流出土砂量は粒径によって差が生じるということを表わしているものと考えられる。

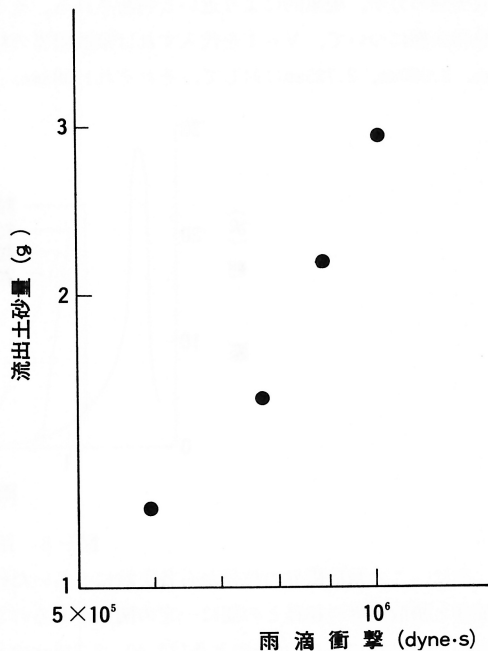


図-7 雨滴衝撃と流出土砂量との関係

IV おわりに

本報告では、一水滴による土粒子の飛散と連続降雨によるノリ面侵食との関連を実験的に追求していく中で、飛散限界雨滴径の存在を示し、それによって、同一降雨強度であっても実際に土粒子の飛散・流出に参与する雨滴衝撃の大きさが、土粒子の粒径の大小によって異なるということを論じた。しかしながら、本論の中で述べたように、雨滴による土粒子の飛散は非常に確率的要素の高い現象であり、また実験データも少ない現時点では断定できない部分も残されている。さらに、飛散距離と流出土砂量との関係についても明らかにしていく必要がある。今後は、実験を積み重ねるとともに、飛散機構の面からもより理論的な検討をすすめていくつもりである。

引用文献

- 1) 江崎次夫：林道のり面の保全に関する研究。九州大学学位論文：180pp, 1984。
- 2) 井上章二：人工降雨によるノリ面の表面侵食に関する研究。愛媛大演報18：81~88, 1981。
- 3) 井上章二・江崎次夫：侵食実験用人工降雨装置について。愛媛大演報18：179~184, 1981。
- 4) 井上章二：マサ土ノリ面の表面侵食におよぼす粒度分布の影響について(I)。第93回日林論：419~420, 1982。
- 5) LAWS, J.O. : Measurements of the fall-velocity of water-drops and raindrops. Trans. of the A.G.U.22 : 709~721, 1941。
- 6) 三原義秋：雨滴と土壤侵食。農技研報A1：1~59, 1951。

(1984年9月28日受理)