

## 固定床水路に堆積した桜島降灰土の掃流機構

長 勝史・河原田禮次郎・田中博文

(生産環境工学講座)

平成3年8月10日 受理

### Transportation-Mechanics of Sakurajima-Volcanic-Ash Drifted Over the Fixed Bed Open Channel

Katsusi CHO, Reijiro KAWAHARADA and Hirofumi TANAKA  
(Laboratory of Water Control and Reclamation Engineering)

#### 結 言

一般に、農業用の開水路は他の目的の水路に比べてその維持管理が充分でない場合が多い。またその通水量の変化も著しく、非灌漑期には完全に通水が停止することもある。したがって設計通水量時には土砂の沈積が起こらないにしても、南九州では水に弱いシラス等の土砂や桜島の降灰が風水によって水路中に多量に流入して堆積が起こり、このため通水時には流水断面の不足をきたし、その機能を著しく低下させている。特に近年激しい噴火活動を続ける桜島の降灰土の水路への堆積は激しく、水路中の降灰の除去に要する労力は多大なものとなっている。そこで開水路に堆積した降灰土を流水によって移動させ、水路中に設置した土砂溜などで堆積除去する方法が考えられる。それには固定床の水路に堆積した降灰土の掃流機構を解明する必要がある。すなわち、従来の河川での掃流理論では説明できない部分があると考えられる。さらに、一般の河川での掃流と異なり土粒子の径も細かく、水路に堆積した降灰土は通水停止時に乾燥して固結現象が生じ、流水による流送を困難にしているように思われる。本研究では、かかる事態に対処するために、固定床上に堆積した降灰土の流送特性を降灰土の物性を考慮しながら、堆積と掃流との境界状態の水理的意味を究明することを目的に、主に実験的な検証を行った。

#### 降灰土の物理的特性

##### 1. 粒度分布と比重

一般に Fig. 1 に示すように桜島の噴出地点の近傍では当然降灰量は多く、大きな粒径成分が分布し、風に乗って遠方に降った降灰土は小さな粒径の成分

が多くなる傾向がみられる。概ね降灰土と呼ばれるものは、鹿児島市街地付近においては最大でも粒子径 4 mm~5 mm 以下のものが大半<sup>2)</sup>で、多くの場合、0.1mm~1.0mm の範囲の粒子径がその大部分を占める。したがって均等係数も 2~3 程度と比較的粒径が揃っている場合が多い。

今回の実験のために採取した降灰土の粒度分布を Fig. 2 に示す。A 試料の中央粒径は  $d_{50}=0.14\text{mm}$ 、B 試料の中央粒径は  $d_{50}=0.17\text{mm}$  であった。いずれも狭い範囲の粒度分布から成っている。また、同図には実際の鹿児島市内の排水路に堆積していた降灰土の粒度分布も併記している。流水によって微細粒子の成分が排除され、比較的大きな粒度のものが残留している。

降灰土は顕微鏡的に見れば様々な形状を呈している。すなわち一般の砂粒子は生成の過程で淘汰され、角がとれ球形と近似できるのに比べて降灰土は角張

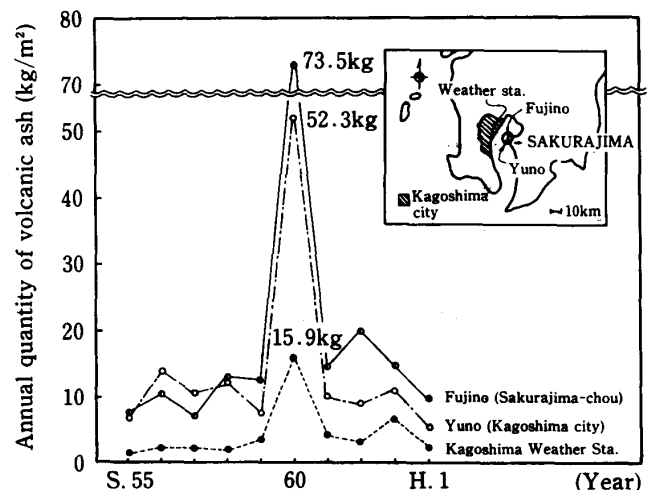


Fig. 1. Changes in the annual quantity of volcanic ash at three stations.

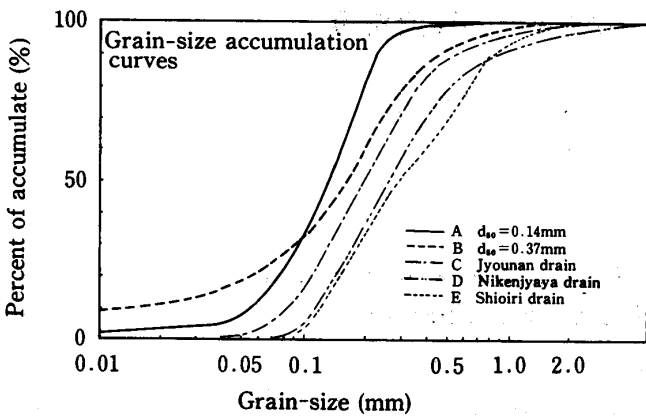


Fig. 2. Grain-size distribution-curves of volcanic ash.

っており、その形状は複雑である。

降灰土の比重は採取場所、採取時期によってかなりの幅があるが、概ね2.65~2.71の範囲のものが多く、一般の砂よりもやや大きな値を示すのが特徴である。

2. 降灰土の水中沈降速度

降灰土の流送には、降灰土の沈降速度も大きく関与する。特に浮遊状態で流送される場合には重要な値である。降灰土は新しい火山噴出物であるため、前述のように一般の砂とはその形状や密度を異にする。すなわち粒子の形状も球形と言うよりもやや角張った形状のものが多く、その密度もやや大きい。このような特性を持った降灰土粒子が沈降速度にどのように、どの程度関与するかを実験的に検討した。

沈降速度は粒子の大きさ、形状、比重、重力の加速度および水の密度と粘性によって決まる。球体が水中を沈降する時の一般式は、一定速度に達した領域（一般に水面から投入して一定の速度に達する時間は極めて短い）では水中の砂粒子に作用する重力による力と砂粒子が流体から受ける抵抗力を等しく置くことによって、次式で表される。

$$W = \left\{ \frac{4}{3} \left( \frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \frac{g}{C_D} d \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、w : 沈降速度、σ : 降灰土の密度  
 ρ : 水の密度 d : 降灰土の粒径  
 C<sub>D</sub> : 抵抗係数。

ただし、上式は粒径 d、沈降速度 w および水の動粘性係数 ν で表した Reynolds 数 R<sub>e</sub> = wd/ν の値が 1~2 程度より大きい領域で成立するといわれている。これ以下の領域では一般に流体の粘性が強く影響する Stokes の法則が適用される。今回実験の対象とした粒子は d=0.1mm 程度以上であるので、粒子レイノルズ数は(1)式で表現される領域の範囲内と

考えられる。

実験は円筒径の容器に入った静水中に降灰土を投入し、沈降速度が一定値に収束した水位以下から一定の距離を降下する時間を計測し、沈降速度を算定した。

Fig. 3 は降灰土の粒子径 d と沈降速度 w との関係の実験結果を示す。降灰土を顕微鏡的に見れば様々な形状を呈しているの、ここではこれを目視的に3通りに分けて表示した。図中には一般の砂粒子の沈降速度を実線で示しているが、比重がやや大きい降灰土にも係わらず沈降速度はむしろ降灰土の方が幾分小さい傾向がみられる。これが降灰土の形状特性によるものと考えられるが、それにしてもその形状の分類による沈降速度の相違および傾向は明確には現れなかった。

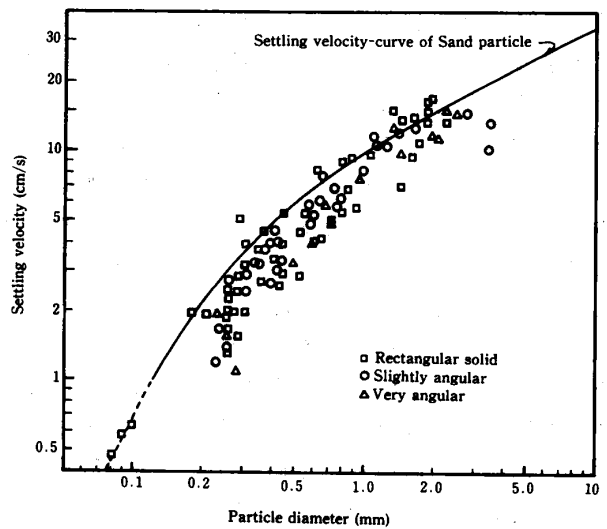


Fig. 3. Relation between settling velocity of ash and particle diameter.

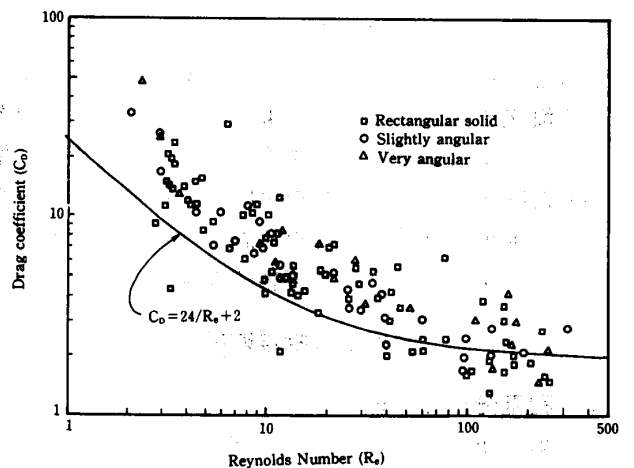


Fig. 4. Relation between drag coefficient of ash and Reynolds Number.

これを(1)式で示す抵抗係数  $C_D$  と粒子 Reynolds 数  $R_p$  との関係で示したのが Fig. 4 である。一般の砂粒子の  $C_D$  の既往の実験結果を実線で示しているが、やはり全体的には降灰土の  $C_D$  の値は大きい傾向が見られ粒子の特性が幾分現れている。いずれにしても、降灰土と砂粒子の沈降速度とでは予想したほどの大きな相違は無いように思われる。

**降灰土が堆積した水路の水理特性**

固定床上に堆積した降灰土の流送機構は、基本的には降灰土の物性と降灰土が堆積した時の水理特性によって決まるものと考えられる。ここでは降灰土が堆積した条件のもとでの流速分布を実験的に検証した。

一般に開水路の鉛直方向の流速分布は理論的には(実験的係数を含んではいるが)自由水面まで対数法則に従うものとされている<sup>1)</sup>。すなわち、

滑面水路については

$$\frac{u}{u_*} = A_s + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_* y}{\nu} \dots\dots\dots (2)$$

粗面水路については

$$\frac{u}{u_*} = A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、  $u$  : 水路底より  $y$  の位置での流速

$u_*$  : 摩擦速度

$\nu$  : 水の動粘性係数,  $k$  : 絶対粗度

$\kappa$  : カルマン常数,  $A_s, A_r$  : 係数

実験水路は長さ8.5m, 幅40cmのアクリル製の側壁を有する鋼製勾配可変水路で、水路床には試料の降灰土(中央粒径  $d_{50} = 0.14\text{mm}$ )を貼付けた床板を敷いた。流速の計測には、熱線流速計を用いた。流量  $Q = 5\ell/\text{sec}$ , 水深  $h = 3.92\text{cm}$  (水路勾配  $i = 1/1000$ ) の場合の水路中央の鉛直方向の流速分布と流量  $Q = 10\ell/\text{sec}$ , 水深  $h = 6.90\text{cm}$  (水路勾配  $i = 1/500$ ) の場合を Fig. 5 に例示している。いずれの場合とも自由水面近傍を除けばほぼ対数法則に近似している。また(2)式において、祢津等<sup>3)</sup>によって滑面水路についての高精度な計測によって得られた  $\kappa = 0.412$  および  $A_s = 5.29$  とした式

$$\frac{u}{u_*} = 5.29 + \frac{1}{0.412} \ln \frac{u_* y}{\nu} \dots\dots\dots (4)$$

にも合致している。ただ自由水面にもこの対数法則がそのまま及ぶのは問題であり、水面と大気とのせん断を考えればむしろ実験値の方が妥当ではないかと判断される。

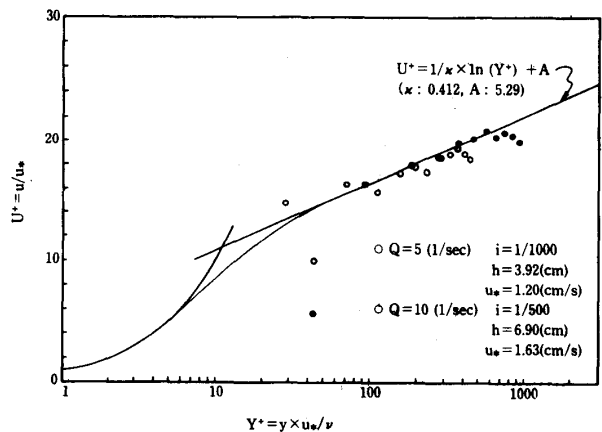


Fig. 5. Mean velocity distribution over ashed bed.

いずれにしても、一般的な粒径の降灰土が堆積した固定床水路は滑らかな水路の領域であり、その流速分布は(4)式で近似できる。ただ極めて大きな壁面抵抗が生じる様な水理条件(一般的には水深および水路の勾配が大きい)の場合には、(2)と(3)式の遷移領域になる可能性が高くなると考えられる。

**降灰土の掃流機構と限界掃流力**

移動床上で流れの速度を次第に増加させていくと、底面に作用するせん断力が次第に増加し、ある限界せん断力  $\tau_c$  以上になると土砂の移動が始まる。流水によっての土砂の輸送形態は一般に掃流砂と浮遊砂に分類される。掃流砂は移動床のごく近傍(移動床から土砂粒径の2倍程度以内)を流砂が土砂におよぼす流れの方向の抵抗力によって輸送されるものである。一方浮遊砂は流れの乱れのもつ拡散作用によって、流水に浮遊されながら流下していくものである。一般的には浮遊砂が生じるような水理条件の場合には、掃流砂も生じていると考えられる場合が多い。

移動床上の砂粒子が移動を開始しようとする、いわゆる限界掃流力  $\tau_c$  の問題は、現象自体が多様であり、支配要素が膨大でしかもそれら相互の関係が複雑であることから、本現象を統一的かつ合理的に説明することは極めて困難である。したがって多くの研究者によって様々な考え方や手法で限界掃流力が提唱されている。しかし、その間にもかなり差異がある。それは土砂が完全な単一粒径では表せないことと、土砂粒子の移動開始の判断がまちまちであることにも原因していると思われる。

勾配  $i$  の水路に水が等流状態で流れるとき、径深を  $R$ , 水の密度を  $\rho$  とすれば、潤辺には平均してせ

ん断応力

$$\tau_0 = \rho g R i \dots\dots\dots (5)$$

が水流と逆方向に作用する。この力は砂粒子を押し流そうとするから、流砂では上式を掃流力  $\tau_0$  という。また、ある河床砂に対して掃流力がある限界値をこえると、砂粒子の移動を開始する。この限界値を限界掃流力  $\tau_c$  という。また、 $\tau_c$  を摩擦速度

$$u_{*c} = \tau_c / \rho = \sqrt{g R i} \dots\dots\dots (6)$$

で表し、限界摩擦速度  $u_{*c}$  という。

Shields<sup>4)</sup> は限界掃流力と粒径との関係は砂粒子の直径を  $d$ 、密度  $\sigma$  の球で近似し一様粒径の砂面の上を流れる場合を考え、流体力と砂粒子の抵抗力(水中重量×摩擦係数)とを等値において、限界摩擦速度を次式で表している。

$$\frac{u_{*c}}{sgd} = \frac{4}{3} \frac{\mu}{C_D \phi^2} \left( s = \frac{\sigma - \rho}{\rho} \right) \dots\dots\dots (7)$$

上式において  $C_D$ 、 $\phi$  は砂粒子 Reynolds 数  $u_* d / \nu$  の関数であるから、限界掃流力の無次元表示は Reynolds 数  $= u_* d / \nu$  の関数となることが期待され、結果的には次式のような Shields の関係式となる。

$$\frac{u_{*c}}{(\sigma/\rho - 1)gd} = \phi(u_* d / \nu) \dots\dots\dots (8)$$

ここでの降灰土の限界掃流力の問題には、従来の河川の掃流を対象とした研究とやや異なり、降灰土という土砂の物性と固定床上に堆積した土砂の掃流現象という特質をもっている。したがってここでは実際の固定床上に堆積した降灰土の限界掃流力を実験的に検討した。

1. 実験装置と方法

実験水路は長さ8.5m、幅40cmの亚克力製側壁を有する鋼製勾配可変水路で、水路床には試料の降灰土を貼付けた床板を敷いた。同水路の中央部付近

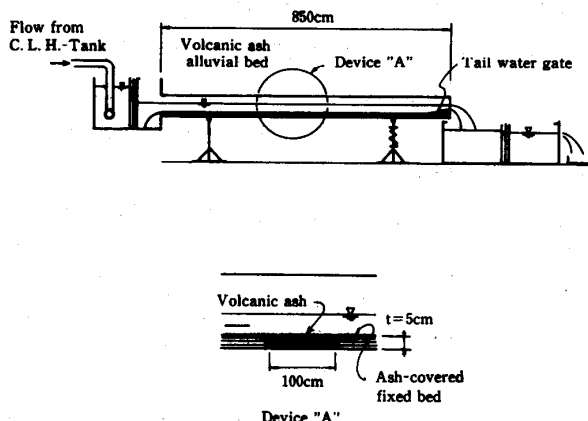


Fig. 6. Experimental setup.

に Fig. 6 に示すようなカートリッジ式の試料箱を設け実験試料を充填した。降灰土の場合には水締めを行い12時間後含水比約30%の状態を実験を開始した。掃流実験は、始めに水路最下流端に設置した水位調節用のゲートを上げた状態で一定の流量を流下させ、非常にゆっくりと段階的にゲートを下げて水面勾配を大きくしていき試料が移動し始めたときを、臨界状態として限界摩擦速度  $u_{*c}$  を求めることとした。

2. 実験結果と考察

まず本実験装置による実験方法の妥当性を調べるために、多くの研究がなされている砂粒子の限界掃流力について実験を行った。砂粒子は均一粒径に近いもの ( $d_{50} = 0.58\text{mm}$ ) を使用した。Fig. 7 に示すように岩垣の理論及び実験曲線の何れの値ともかなり一致した傾向が見られた。このことから、砂粒子に対する従来の限界掃流力の考え方にのっとった実験手法であったと考えられる。

次に降灰土について砂の場合と同じ方法で実験を行った。降灰土についてはアスペクト比(水路幅/水深)が2~4、4~8の場合について実験し、Table 1 の様な結果が得られた。これを Fig. 7 にも併記した。図からもわかるように、降灰土の場合、砂粒子よりも多少大きな掃流力を必要とするようである。特に中央粒径  $d_{50} = 0.14\text{mm}$  の場合は実験値が岩垣の理論曲線に比べてやや上位にある。この実験の場合のように、粒子 Reynolds 数が2.0以下については一般の砂の実験結果が少なく(河川の掃流の場合には、このような微細粒子の掃流についてはあまり議論の対象にはならない場合が多い)、降灰土と砂の直接的な比較は困難であるが、粒子形状の違いが一要因であると考えられる。すなわち砂粒子が生成の過程で淘汰され角がとれ球形と近似できるのに対して降灰土は角張っており流れ難いものと思われ

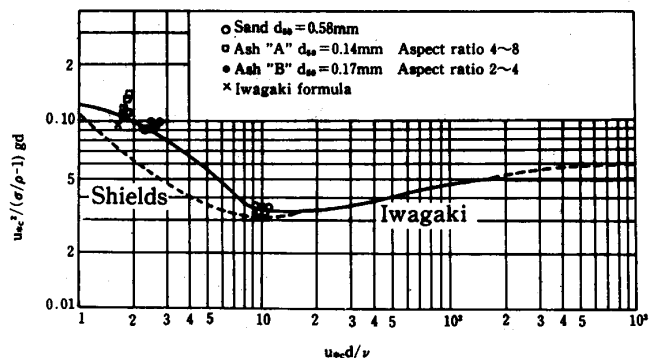


Fig. 7. Critical tractive force curves.

る。

ただ水路に流入し堆積した降灰土が掃流し始める場合には、固定水路上の降灰土の下にもさらに降灰土が存在しているので、“固定床”上に堆積した土砂の掃流という特質はそれほど限界掃流力には影響は

Table 1. Results of critical tractive force experiments

Particle	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Particle diameter (mm)	Reynolds number	Dimensionless critical shear stress	
Volcanic ash	2.70	0.17	2.72	0.096	
			2.62	0.094	
			2.58	0.092	
			2.52	0.087	
			2.35	0.087	
			1.76	0.117	
				1.87	0.131
				1.94	0.135
				1.87	0.131
				1.74	0.114
				1.76	0.117
				1.76	0.117
			Sand	2.65	0.58
9.96	0.034				
9.67	0.032				
10.03	0.032				
10.23	0.034				
10.23	0.034				

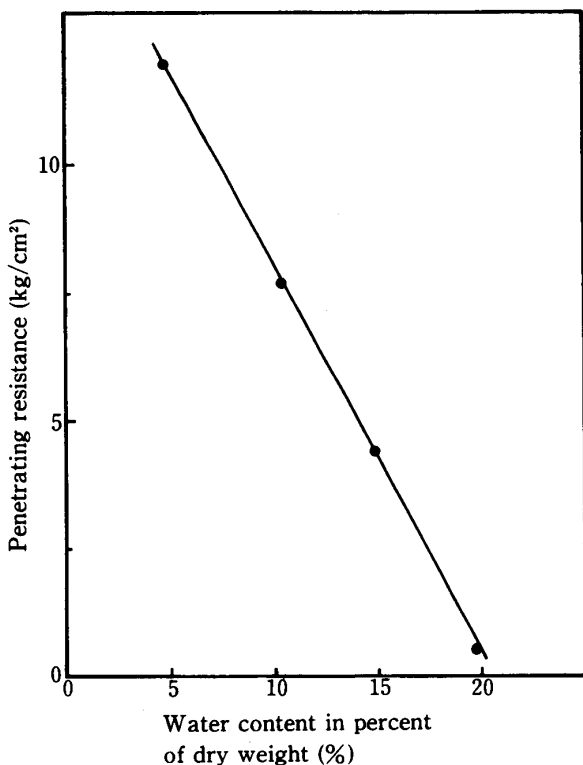


Fig. 8. Relation between penetrating resistance and water contents.

ないと考えられる。いずれにしる、当初予想した程の砂粒子との顕著な差はないようである。

なお一旦水路中に流入した降灰土は、送水が停止して水路底に堆積した状態では次第に乾燥していくにつれて細粒子が固結しあい凝集力を増加する。すなわち Fig. 8 に示すように、プロクター貫入試験によって得られた降灰土中の含水比と抵抗値との関係からも明らかなように、乾燥するにつれて抵抗値は急速に大きくなる。このことが降灰土の流送を困難にしている大きな要素ではないかと考え、実験水路に降灰土の試料を充填する際に、降灰土の試料を乾燥させ、含水比を種々変えて実験を行った。しかし限界掃流力にほとんど差異は無く、実験誤差の範囲内であった。これは乾燥過程で固結した降灰土でも、一旦水に接すれば直ちに元の粒子結合状態に戻るためであると考えらる。したがって固結した降灰土は流送速度はやや低下するにしても、限界掃流力にはほとんど影響しないと判断される。

#### 降灰土掃流時に発生する砂漣と掃流過程

##### 1. 固定床上の砂漣の特性

降灰土が堆積した水路に限界掃流力を越える水理条件を与えると、降灰土は流送を開始する。これに伴って流水と境界をなす堆積降灰土に変化が生じる。すなわち一般の河川の掃流時と同様に水路床形状が変化する。河川の場合でも掃流に伴って様々な河床形態が存在する。河床状態は規模の大きな砂州から、流速や水深などのいわゆる外部変量によって決まる砂堆・平坦床・反砂堆、さらに最も小規模な砂漣・砂線が存在すると言われている<sup>5)</sup>。

本実験の場合、砂漣が発生した。一般に砂漣は流れが限界掃流力を越えた直後に発生し、砂漣の形状は2次元的なものから3次元的なものまで多岐にわたっており、その分類や発生領域は不明な点が多い。また砂漣は河床付近の乱れの構造と深く関わりあっていると考えられている。

砂床での観測によると砂漣の縦断形状は上流側が緩い勾配で下流側はほぼ安息角に等しい急傾斜をなし、近似的に三角形に近く、頂上より流れが剥離し、このために大きな流水抵抗を生じる。一般の砂土の砂漣の波長  $\lambda$  は砂粒子径  $d$  の約1000倍程度、波形勾配(波高/波長)は0.1程度であると言われている<sup>5)</sup>。また粒子 Reynolds 数  $Re = u_* d / \nu$  が小さい場合に生じると言われており、砂粒子での発生領域は概ね次式で表される。

$$u_*d/\nu < 20 \dots\dots\dots (9)$$

この粒子 Reynolds 数  $=u_*d/\nu$  は河床面が水理的に滑面であるか粗面であるかを判定するパラメータであり、20という値は滑面と遷移領域の境界値に近い。したがって砂漣の発生には水の粘性力がなにかしかの働きを持つものと推測されている。

一方、砂漣が形成されるには、河床が水流によってある程度活発に移動する必要がある。それゆえ次の条件が満足されなければならない。

$$\tau_* = \frac{u_*c}{sgd} > \tau_{*0} = 0.1 \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $s : (\sigma/\rho - 1)$  で水中比重。

$\tau_{*0}$  は河床材料が活発に動き出すときの無次元掃流力で概ね定数である。(9)と(10)式より砂漣の発生限界は具体的には Fig. 9 のようになる。すなわち  $d=0.6$  mm 程度以上の粗い砂では砂漣は形成されないことになる。

前章で述べた実験装置において降灰土が掃流され

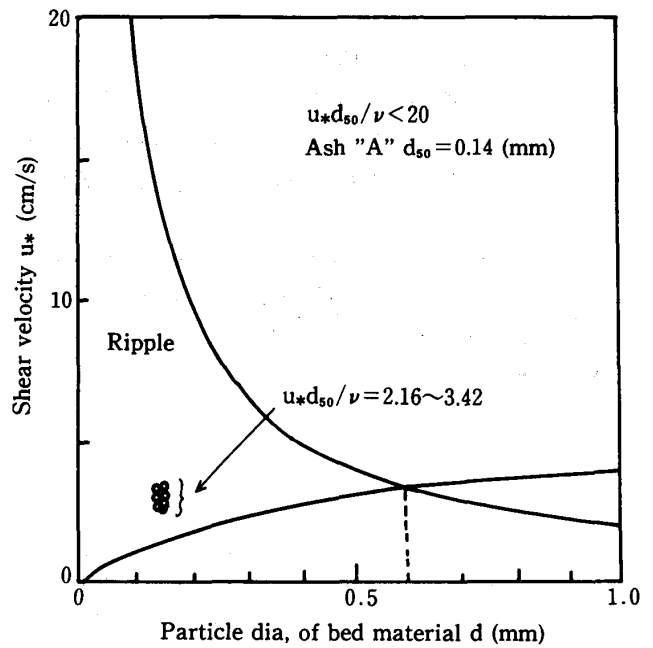


Fig. 9. Limiting conditions for ripples.

Table 2. Characteristics of ripples

Particle dia. d (mm)	W. D. h (cm)	S. V. u. (cm/s)	R. L. λ (cm)	R. H. H (cm)	T. V. v <sub>t</sub> (cm/s)	C. T. (min.)	H/λ	Run no.
0.14 (Volcanic ash)	4.38	1.50	6.3	0.5	3.5	1.8	0.079	05-400-03
	3.34	1.99	8.0	0.6	5.8	1.4	0.075	05-400-04
	4.19	1.57	7.5	0.6	3.0	2.5	0.080	05-900-03
	3.48	1.96	7.4	0.6	5.5	1.3	0.081	05-900-04
	8.73	1.44	6.4	0.5	2.0	3.2	0.078	10-400-04
	7.69	1.67	6.8	0.5	4.0	1.7	0.074	10-400-05
	8.69	1.44	8.5	0.6	2.0	4.3	0.071	10-900-03
	7.53	1.67	7.4	0.6	5.5	1.3	0.081	10-900-05
0.37 (Volcanic ash)	3.89	1.77	10.6	0.8	8.0	1.3	0.075	05-400-11
	4.45	1.56	10.0	0.7	6.0	1.7	0.070	05-400-13
	3.82	1.76	8.7	0.7	7.2	1.7	0.070	05-900-11
	7.70	1.66	9.8	0.7	5.1	1.9	0.071	10-400-11
	6.60	1.94	10.7	0.8	10.7	1.0	0.075	10-400-12
	7.67	1.68	9.4	0.7	5.8	1.6	0.074	10-900-11
0.37 (sand)	6.52	1.97	10.0	0.8	8.2	1.2	0.075	10-900-12
	7.28	1.75	10.3	0.8	6.4	1.6	0.078	10-400-51
	7.50	1.71	9.5	0.5	5.5	1.7	0.053	10-400-52
	7.71	1.66	9.7	0.6	5.0	1.9	0.062	10-900-51
0.63 (Volcanic ash)	6.61	1.93	9.4	0.8	9.1	1.0	0.085	10-900-52
	6.57	1.88	12.2	0.7			0.057	10-400-21
	5.51	2.30						10-400-22
	7.20	1.76	15.2	1.0			0.066	10-900-21
	6.14	2.13	13.3	0.7			0.053	10-900-22

W. D. : Water-depth                      S. V. : Shear velocity  
 R. L. : Ripple-length                    R. H. : Ripple height  
 T. V. : Transport velocity of ripple    C. T. : Cycle time of ripple

た場合でも Fig. 9 の図中に示すようにこの範中にあり、砂漣を形成しながら降灰土は流送された。発生した砂漣の形状値を Table 2 に示している。砂漣の形状すなわち波長と摩擦速度  $u_*$  との関係を図. 10 に、波高と摩擦速度  $u_*$  との関係を図. 11 に示す。バラツキはあるものの砂漣の波長や波高は、摩擦速度すなわち水理条件にはそれほど影響されず、むしろ粒子の大きさで決まる傾向がみられる。すなわち Table 3 に示すように、波長と粒子径との関係では  $\lambda = \alpha d$  とした場合の  $\alpha$  の値は同一径ではほとんど一致した値を示しているが、前にも述べた砂土の場合の  $\alpha = 1000$  とはかなりの相違がある。すなわち波長は単に粒径だけの関数  $\lambda = \alpha d$  では表示出来ない関係であると考えられる。なお同じ実験装置と方法で行った同一粒径の砂で対比した場合でも Table 2 に示したように降灰土の場合とそれほど差異のない波長・波高を形成する。一方、移動床上に形成される砂漣と、固定床上に形成される砂漣とは

Fig. 12 に示すようにその形状を異にする。すなわち、固定床上に発生する砂漣は一部は固定床が露出するケースが多く、このために砂漣上の流速および乱れ特性が、全体が移動床の場合とは、砂漣の形状に違いがでるものと考えられる。このことが砂漣の

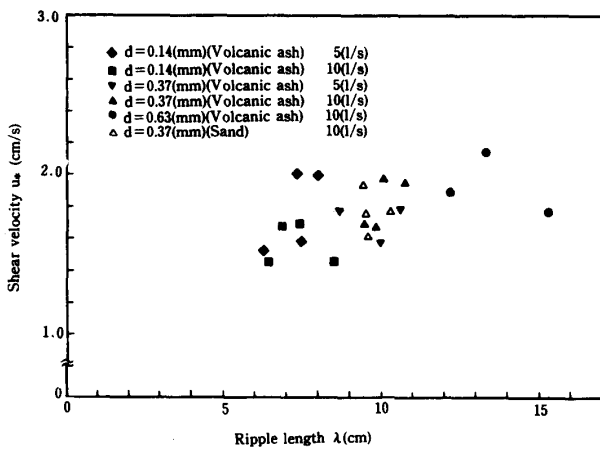


Fig. 10. Relation between ripple length and shear velocity.

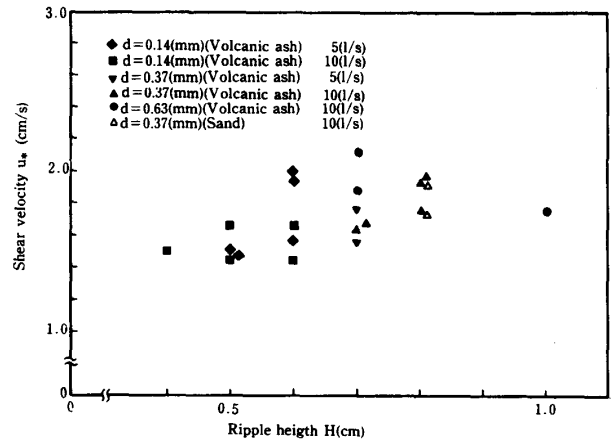


Fig. 11. Relation between ripple height and shear velocity.

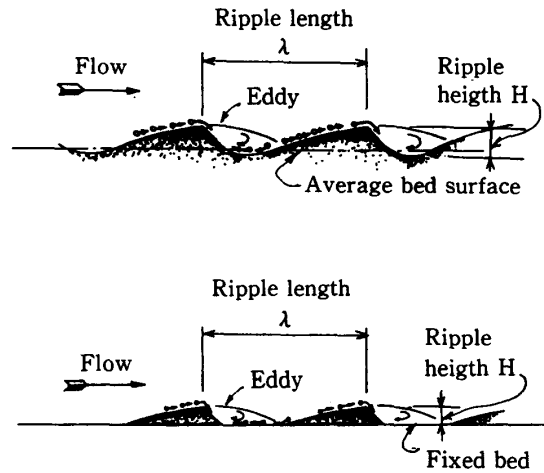


Fig. 12. Definition sketch for particle flow over ripple.

Table 3. Relation between ripple-length and particle-diameter

d=0.14mm Run no.	Volcanic ash		Sand	
	$\alpha$	d=0.37mm Run no.	$\alpha$	d=0.37mm Run no.
05-400-03	450	05-400-11	286	10-400-51
05-400-04	571	05-400-13	270	10-400-52
05-900-03	536	05-900-11	235	10-900-51
05-900-04	529	10-400-11	265	10-900-52
10-400-04	457	10-400-12	289	
10-400-05	486	10-900-11	254	
10-900-03	607	10-900-12	270	
10-900-05	529			
Average	521	Average	267	Average
				263

$$\alpha = \lambda/d$$

長さにも影響しており、固定床上の掃流機構と移動床上の掃流現象との相違点であろう。

2. 砂漣上の降灰土の掃流状況

水路に堆積した降灰土 ( $d < 0.6\text{mm}$ ) は限界掃流力以上の掃流力が作用する水理条件の場合には砂漣を生じながら流送されて行く。その際の降灰土の掃流状況は、Fig. 12 に示したように土砂は砂漣上を転がり這い上がりながら流下し、砂漣の最下流端で沈降する。その後方の砂漣の傾斜面上の砂土を掃流して再び砂漣の最下流端で土砂が降下する。すなわち堆積土の移動はその上面によって行われる。これが繰り返された砂漣は下流方向に進行することになる。これは掃流初期に発生した砂漣(水路床の形態変化)に伴う流れの抵抗の変化によるものと考えられる。

Fig. 13 は砂漣を模した固定した三角形波上の流速分布の計測値を示している。砂漣上の流れは、砂漣の上昇側上り斜面上の流れと砂漣背後の剝離流の部分にわけられ、前者は漸縮流れ、後者は浅い段落ちステップ上の流れと共通の特性をもっている。砂漣頂部より剝離した流れは、段落ちステップ上の流れと同様に自由せん断流としての特質をもち、その下部の底面との間には剝離流による渦領域が形成される。剝離流線は下流側の砂漣の斜面上で再付着し、この点から砂漣上の底面との粘性作用による境界層が発達し始める。乱れは流速勾配が大きい再付着点のあたりで最も強い。したがって砂漣を形成する降灰土は、この乱れが激しくせん断力の大きくなる地点付近で最も大きな掃流を生じ、砂漣背後(下流端)の剝離後の渦発生領域ではせん断力は逆向きとなり、流送されてきた降灰土はここで沈降することになる。この現象が繰り返され、ある一つの砂漣は下

流側に移動しているような形態をたどる。このようにして降灰土は全体として下流方向に流送されることになる。

砂漣の下流側への進行速度、すなわち降灰土の掃流速度は当然掃流力に比例的であると考えられる。Fig. 14 は平均的な有効摩擦速度  $u_*$  (実際には砂漣が形成された水路底では流れ方向で摩擦速度  $u_*$  は異なる) と砂漣の進行速度との関係を示す。なお、ここでは摩擦速度  $u_* -$  限界摩擦速度  $u_{*c}$  を有効摩擦速度と定義している。降灰土の粒子径によって限界掃流力が異なるので、砂漣の進行速度も粒径によって差があり、同一水理条件であれば粒子が小さいほど砂漣の進行速度は遅くなる。このことは前述の砂漣の動向に関係していると考えられる。すなわち、砂漣の上り斜面上で大きなせん断力を受けて降灰土を流下させ、砂漣背面でこれを沈降させる形態であるため、粒子が大きい場合でも小さな場合でも掃流される粒子の個数に大差はない。しかし、流送土砂の体積は近似的に粒子径  $d$  の 3 乗に比例することから、粒子が大きい降灰土の場合には、小さい時に比べて砂漣の移動速度は大きくなる。したがって粒子が小さな降灰土の場合には掃流速度は遅くなることになる。

また、同一径では摩擦速度  $u_*$  が大きくなれば全体的な傾向としては砂漣の進行速度も大きくなっていくがそのバラツキは大きい。これらのことは前述のように砂漣の形状が摩擦速度  $u_*$  の大きさにはあまり左右されず、粒径に強く影響されるために、水深などの水理条件のみで掃流量が決まることにはな

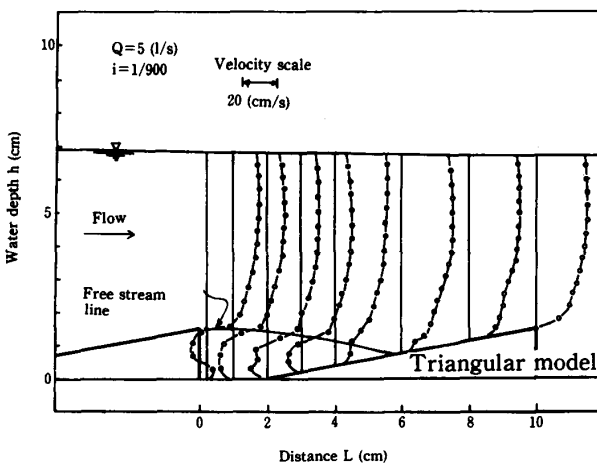


Fig. 13. Velocity distribution over triangular ripple model.

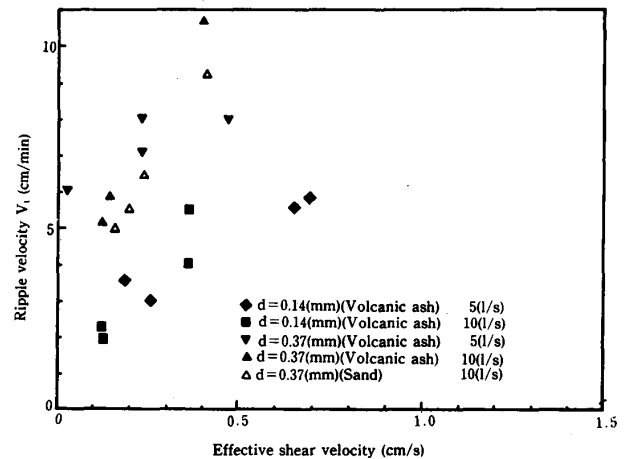


Fig. 14. Relation between ripple velocity and effective shear velocity.



らないためと考えられる。

## 要 約

本研究では、固定床上に堆積した降灰土の流送特性を降灰土の特性を考慮しながら、主に実験的な検証を行った。結果を要約すると次のようになる。

1. 降灰土は角張って形状は複雑であり、粒子径は鹿児島市街地付近では概ね0.1mm～1.0mm程度のもが多く、比重は2.65～2.71と一般の砂よりもやや大きな値を示す。比重がやや大きい降灰土にも係わらず水中での沈降速度はむしろ降灰土の方が幾分小さい。これは降灰土の形状特性によるものと考えられる。

2. 降灰土が堆積した水路の流速分布は自由水面近傍を除けばほぼ対数法則で近似され、一般的な粒度の降灰土が堆積した固定水路は滑らかな水路の領域である。

3. 固定水路に堆積した降灰土を流水で流送するのに必要な限界掃流力は砂土よりも若干大きく、これは粒子形状の違いに起因すると考えられる。水路中に堆積した降灰土は、送水が停止して水路底に堆積した状態では降灰土は乾燥過程において細粒子が固結し合い凝集力を増加するが、限界掃流力に大きな差異がなかったことから、一旦水に接すれば直ちに元の粒子結合状態に戻ると思われる。

4. 水路に堆積した降灰土は限界掃流力以上の掃流力が作用する水理条件の場合には砂漣を生じながら流送される。その際の降灰土の掃流状況は、土粒

子が砂漣上を転倒しながら流下し、剝離流となる砂漣の最下流端で沈降する。さらにその後方の砂漣の傾斜面上の土粒子を掃流して再び砂漣の最下流端で粒子が沈降する。この現象が繰り返され、一つの砂漣は下流側に移動しているような形態をたどり、降灰土は全体として下流方向に流送される。降灰土の砂漣の波長や波高は同一粒径であれば水理条件に係わらずほぼ一定値を示す。同一粒径の砂ともそれほど差はない。ただ固定床上に形成される砂漣は移動床上に形成される砂漣とその形状を異にする。

5. 砂漣の下流側への進行速度は粒子径によって差があり、粒径が小さいほど遅くなる。同一径では摩擦速度が大きくなれば砂漣の進行速度も大きくなる。

終わりに本研究は、科学研究費一般研究(B)により行われた一部である。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

- 1) 土木学会編：水理公式集，pp.214，1971年
- 2) 春山元春：桜島火山灰・砂の物理的諸性質，文部省自然災害特別研究，pp.87-88，1977年
- 3) Nezu, I., Rodi, W.: Open-channel flow measurement with a laser Doppler anemometer, J. Hydraul. Eng. ASCE 112, pp. 335-355, 1986
- 4) 椿 東一郎：水理学II，pp.216-219，1982年
- 5) 吉川秀夫：流砂の水理学，pp.195-200，1985年

## Summary

This experimental investigation have been carried out clarify the transportation mechanics of Sakurajima volcanic ash drifted over the fixed bed open channels, with taking physical properties of ash particles into account. The main findings of the present study can be summarized as follows:

1. The ash particles are very angular and jagged, the particle sizes range approximately 0.1mm to 1.0mm in diameter in Kagoshima city. The specific gravity of ash range 2.6 to 2.71, these values are a little large than ordinary sand. The settling velocity of ash particles in water are slightly slower than sand in spite of large in specific gravity than sand.

2. The distributions of the velocity over ashed bed channels show the log-law except the near water surface regions. Ordinary ashed bed channels are classified as a smooth channel surface.

3. The critical tractive force of ash over the fixed bed is little larger than that of sand, because of the difference of particle feature. Smaller ash particles usually set each other and increase flocculation during dry-process, however the differenc between ash and sand tractive force can not be seen in this experiment. We consider that ash particle become weak flocculation in being flooded with water.

---

4. A free surface flow over the ashed bed generates sediment transportation and ripple form. Ash particles roll and run over the ripple crest and fall at the leeward because of separation, and continues scour and deposition toward the downstream. Ripple length and height do not depend on flow depth, but particle diameter. However ripple form over the fixed bed is distinguish from it over the movable bed.

5. Movement speed of ripple changes according to particle diameter. The smaller diameter particle makes slower the speed, and same diameter particle makes faster movement according to shear-velocity increase.