

砂粒子を高濃度に含む流れに及ぼす粒子径の影響

江頭 進治・佐藤 隆宏・千代 啓三

EFFECT OF PARTICLE SIZE ON THE FLOW STRUCTURE OF SAND-WATER MIXTURE

By Shinji EGASHIRA, Takahiro SATO and Keizo CHISHIRO

Synopsis

Discussions are made on the effect of particle size on the flow structure of sand particle-water mixture in order to investigate the mechanics of debris/mud flows and general sediment laden flows. The experimental results show that a quasi-laminar region is formed on the movable bed even in the flow of fine sediment-water mixture and its depth increases with the increase of sediment concentration as well as of particle size. Generally, the equilibrium bed slope can be predicted in terms of particle to particle friction angle and sediment concentration in the case that sediment particles behave as a laminar motion, which is common in debris flows composed of coarse sediment. But, it is realized that the bed slope becomes smaller than that of debris flows. A two-layer model which constitutes the upper and lower layers is proposed to describe such phenomena. The shear stress in the upper layer is governed by turbulent motions, and in the lower layer by the constitutive relations developed by Egashira, et al.

1. 緒 言

砂粒子を高濃度に含む流れは、土石流や泥流あるいは一般の流砂現象の問題に関連して活発に研究されている。これらの研究において、粒子径が大きく、それが層流的な運動をするような領域の流れについては、粒子間摩擦や衝突を考慮した解析モデルが提案され、実用的にはある一定のレベルに達している^{1)~3)}。また、粒径が小さく、かつ、濃度も小さい流れの領域については、浮遊砂流に関する研究をはじめとして多くの研究成果があって、局所平均流の構造はかなり明らかにされている^{4)~6)}。現在、研究は乱れの構造の解明に向かっている。さらに、一般の浮遊砂流の領域よりもさらに高濃度の領域を対象にしたものに新井・高橋⁷⁾や Winterwerp⁸⁾らの研究がある。前者は、プラントル型の運動量輸送と粒子衝突とからなる応力を考慮した解析を行い、後者は、対数則を基本として、粒子径や粒子濃度と速度勾配の関係を議論している。

江頭・芦田ら⁹⁾は上述の二つの研究と同様、粒径 0.017 cm の微細砂を用いて濃度 0 % ~ 30 % の領域において開水路実験を行い、次のような事実を見いだした。すなわち、一般の浮遊砂流の領域から粒子濃度が増加すると粒子拡散係数は減少し、流れの場は層流的な挙動になる。反面流れの抵抗は粒子濃度が 10 数 % を越えるあたりから増加する。これは、粒子濃度が低い領域においては乱れによるエネルギー散逸が卓越するが、濃度の増加に伴いレイノルズ応力に代わる何らかの応力が卓越するようになることを意味する。そこで、江頭・佐藤・千代¹⁰⁾は、その応力はクーロンの粒子間摩擦であるとの仮説をたて、それを実証するために平衡河床勾配に関する実験を行った。その結果、当初予想した通り平衡河床勾配は粒子濃度の増加に

伴い微細砂の濃度と摩擦角に規定されるようになるものの、これは土石流のように粒子が層流的な運動をするときの平衡勾配よりも小さいことが判明した。この事実は、微細砂を高濃度に含む流れは乱流と層流の二つの側面を持っていることを示しており、平衡河床勾配は、流れの上層を乱流領域、下層を層流領域とする 2 層モデルによって説明される¹⁰⁾。

本研究は上述の研究の進展を目指したものであり、ここでは局所平均流速や平衡河床勾配に及ぼす粒子径や粒子濃度の影響を水路実験によって検討するとともに、2 層モデルによるそれらの解析を試みる。

2. 実験的考察

2.1 実験条件

実験に用いた水路は幅 9.8 cm、長さ 4 m、片面ガラス張りの開水路である。水路上流端には、砂と水を混合して流すための攪拌槽や定水頭タンクが設置されており、任意の濃度をもつ高濃度流を定常的に供給できるようにされている。実験に用いた砂は、中央粒径 0.017, 0.030, 0.066, 0.188 および 0.201 cm のほぼ一様な砂で、それらの比重は 2.64~2.66 の範囲にある。摩擦角は、38.5~39.0° の範囲にある。

実験は、水路下流端に砂止め堰を設置し、上流端から砂と水の混合物を定常的に供給して水路に移動床を形成させ、流出流量及び砂粒子濃度が変化しなくなった状態、すなわち平衡状態の流れを対象として行った。測定項目は、平衡河床勾配、流動深及び流速分布である。河床勾配は、平衡状態が達成されたと思われる時点においてガラス側壁に糸を張り、その勾配を測定するような方法で求め、流動深及び流速分布は、砂粒子やトレーサの移動を高速カメラで撮影した後、画像解析によって求めた。

実験条件及び結果の一部を **Table 1** に示す。ここに d : 砂の中央粒径, θ_0 : 水路床勾配, θ_e : 平衡河床勾配, q_m : 混合物の単位幅流量, q_w : 水の単位幅流量, q_s : 単位幅流砂量, c : 輸送濃度, h_m : 流動深, h_{2u} : 移動砂層厚の上限値, h_{2d} : 移動砂層厚の下限値である。実験条件の設定にあたっては、流れの構造におよぼす粒径の効果や粒子濃度の影響を見るため、混合物の流量をほぼ一定にし、上流側の固定床と水路内に形成される移動床との境界における擾乱の影響をなるべく少なくするため、粒子濃度に応じて水路勾配 θ_0 を調節して移動床がなるべく長くなるよう留意されている。

2.2 実験結果

平衡河床勾配に関する実験値を **Fig. 1** に示す。図の最上部の曲線は、平衡勾配と砂粒子濃度に関する次式^{1), 12)}によるものである。 h_2/h をパラメータとして描かれている点線群は 2 層モデルによる計算結果であって、これについては後述する。

$$\theta_e = \arctan \left\{ \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \tan \phi_s \right\} \quad \cdots \cdots (1)$$

さて、上式は、砂粒子が全段面に一様に分散し、かつ、粒子は層流運動をするという前提のもとに得られている。このこと及び図の横軸は、砂粒子の輸送濃度であることを念頭において実験データを見よう。これによれば、 $d = 0.188$ cm のデータは、濃度の小さいところを除いてほぼ式 (1) に従うものの、粒径が小さくなるにともない、同一濃度に対する平衡勾配は減少することが示されている。このことは $d = 0.188$ cm の流れは粒子が層流運動をして土石流の

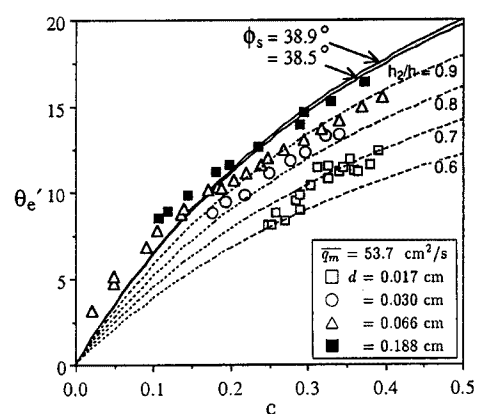


Fig. 1 Influence of sediment particle size on the equilibrium bed slope. c is the sediment concentration defined as the ratio of sediment discharge rate and flow discharge of the mixture.

Table 1 Hydraulic conditions for laboratory tests

Run No.	d	θ_0	θ'_e	q_m	q_w	q_s	c	h_f	h_m	h_{2u}	h_{2d}
	cm	deg.	deg.	cm ² /s	cm ² /s	cm ² /s		cm	cm	cm	cm
A-0- 1	0.017	8.7	8.2	59.3	44.6	14.7	0.248	0.81			
A-0- 2	0.017	8.4	8.2	51.3	38.4	12.9	0.252	0.78			
A-0- 3	0.017	9.8	8.9	54.4	40.4	14.0	0.257	0.80			
A-0- 4	0.017	8.7	8.4	55.3	40.3	14.9	0.270	1.05			
A-0- 5	0.017	10.5	9.5	59.2	42.4	16.8	0.284	0.83			
A-0- 6	0.017	9.7	9.9	57.1	40.6	16.5	0.289	1.00			
A-0- 7	0.017	10.0	9.9	56.6	40.3	16.4	0.289	0.98			
A-0- 8	0.017	9.5	9.0	67.0	47.6	19.5	0.290	1.06			
A-0- 9	0.017	10.5	10.4	58.7	40.9	17.8	0.303	0.93			
A-0-10	0.017	11.7	11.5	50.5	34.8	15.7	0.311	1.80			
A-0-11	0.017	12.5	10.8	53.0	35.8	17.2	0.325	0.74			
A-0-12	0.017	11.0	11.6	58.2	39.2	19.0	0.326				
A-0-13	0.017	12.8	11.3	59.1	39.0	20.1	0.339	0.78			
A-0-14	0.017	12.0	11.5	56.7	37.1	19.5	0.345	0.79			
A-0-15	0.017	12.0	11.9	51.2	31.6	17.2	0.353	0.88			
A-0-16	0.017	12.5	11.4	52.1	31.9	17.8	0.359	0.93			
A-0-17	0.017	13.2	11.3	53.6	32.5	18.6	0.364	0.79			
A-0-18	0.017	13.8	11.6	55.7	33.0	20.1	0.379	0.84			
A-0-19	0.017	14.0	12.5	64.5	39.3	25.2	0.391	1.21			
A-0-20	0.188	10.2	8.5	54.6	48.8	5.8	0.107	0.99			
A-0-21	0.188	11.0	8.9	54.9	48.4	6.5	0.119	0.88			
A-0-22	0.188	11.3	9.9	54.7	46.8	7.9	0.145				
A-0-23	0.188	13.5	11.2	54.4	44.5	9.9	0.182	0.91			
A-0-24	0.188	13.5	11.6	55.4	44.5	10.9	0.198	1.01			
A-0-25	0.188	16.0	12.7	67.0	47.2	19.8	0.235	0.93			
A-0-26	0.188	16.2	14.0	54.3	38.6	15.7	0.290	1.02			
A-0-27	0.188	17.0	14.6	54.2	38.2	16.0	0.295	1.04			
A-0-28	0.188	18.0	15.3	53.7	36.0	17.8	0.330	1.24			
A-0-29	0.188	19.2	16.5	53.7	33.7	20.0	0.372				
A-1- 1	0.030	10.0	8.9	53.0	43.6	9.3	0.176	0.74	0.98	0.99	0.81
A-1- 2	0.030	10.5	9.5	53.0	42.7	10.3	0.194	0.70	1.06	1.06	0.93
A-1- 3	0.030	11.1	9.9	53.1	41.5	11.6	0.218	0.77	1.13	1.08	0.97
A-1- 4	0.030	12.2	11.2	52.7	39.6	13.1	0.249		1.15	1.13	1.03
A-1- 5	0.030	13.2	11.8	52.8	38.2	14.6	0.277	0.78	1.17	1.14	1.02
A-1- 6	0.030	13.8	12.4	53.2	37.4	15.8	0.296	0.83	1.27	1.23	1.10
A-1- 7	0.030	14.4	13.3	53.5	36.3	17.2	0.322	0.92	1.41	1.43	1.32
A-1- 8	0.030	14.7	13.4	51.4	33.9	17.5	0.340	0.90	1.38	1.39	1.27
A-2- 1	0.066	4.8	3.2	50.7	49.7	1.0	0.020	0.81	1.08	0.61	0.49
A-2- 2	0.066	6.5	4.7	50.4	48.0	2.4	0.048	0.75	1.08	0.68	0.51
A-2- 3	0.066	6.5	5.2	51.7	49.2	2.5	0.049	0.75	1.00	0.68	0.58
A-2- 4	0.066	8.4	6.9	51.0	46.4	4.6	0.091	0.69	1.03	0.80	0.64
A-2- 5	0.066	9.2	7.8	51.7	46.3	5.4	0.104	0.71	0.95	0.71	0.64
A-2- 6	0.066	10.3	8.8	51.0	44.1	6.9	0.136	0.70	1.05	0.83	0.75
A-2- 7	0.066	10.5	9.1	50.9	43.9	7.1	0.139	0.73	1.02	0.84	0.74
A-2- 8	0.066	11.7	10.2	51.0	42.3	8.7	0.171	0.71	0.90	0.78	0.60
A-2- 9	0.066	11.8	10.3	51.2	41.8	9.3	0.182	0.75	0.99	0.86	0.76
A-2-10	0.066	12.0	10.3	50.9	41.3	9.5	0.187	0.70	0.98	0.82	0.72
A-2-11	0.066	12.3	10.8	51.8	41.3	10.6	0.204	0.76	0.99	0.93	0.76
A-2-12	0.066	12.7	11.2	51.4	40.2	11.3	0.219	0.80	0.94	0.86	0.71
A-2-13	0.066	13.4	11.7	51.2	39.0	12.2	0.238	0.83	0.89	0.82	0.71
A-2-14	0.066	13.5	12.1	50.9	38.3	12.6	0.247	0.79	0.94	0.84	0.73
A-2-15	0.066	14.3	12.5	51.4	37.8	13.8	0.268		0.90	0.88	0.83
A-2-16	0.066	14.8	13.1	51.7	36.6	15.2	0.294	0.87	1.03	0.92	0.82
A-2-17	0.066	15.4	13.7	50.9	34.9	16.1	0.317	0.90	1.04	1.01	0.86
A-2-18	0.066	15.8	14.2	51.4	34.1	17.5	0.340	0.96	1.10	1.02	0.93
A-2-19	0.066	16.8	15.0	51.3	32.5	18.9	0.369	0.90			
A-2-20	0.066	17.5	15.6	52.0	31.4	20.6	0.396	1.06			
A-3- 1	0.017	11.4	10.8	53.3	37.5	15.8	0.297	0.83	1.35		
A-3- 2	0.030	13.8	12.4	53.2	37.4	15.8	0.296	0.83	1.27	1.23	1.10
A-3- 3	0.066	14.8	13.1	51.7	36.5	15.2	0.294	0.87	1.03	0.92	0.82
A-3- 4	0.201	16.0	14.6	53.1	37.5	15.6	0.295		1.97		

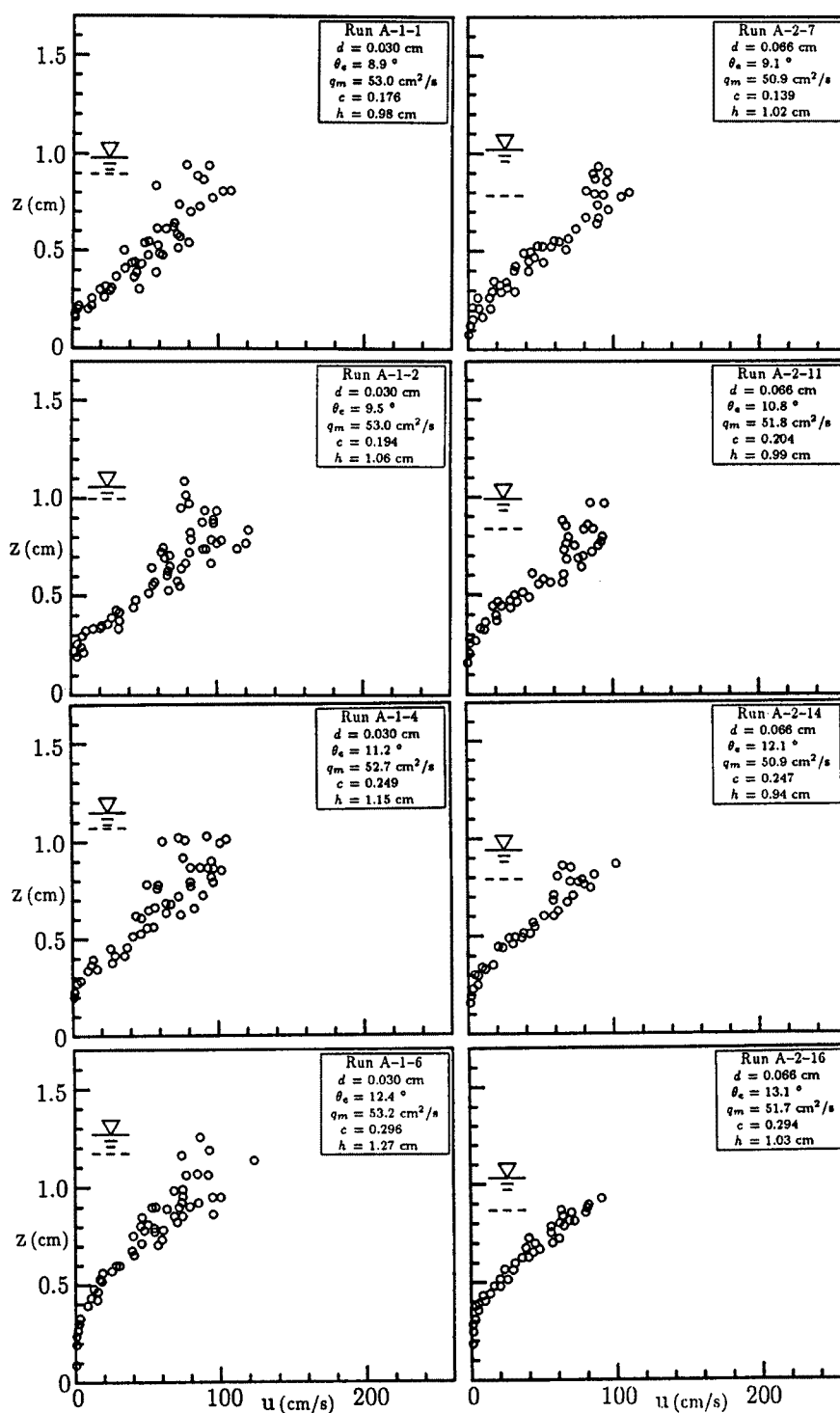


Fig. 2 Changes of velocity profiles due to sediment concentration and particle size.

構成則に従うが、粒子径が小さくなるに伴い、乱流拡散等による粒子の浮遊現象が現れてくることを示唆している。

Fig. 2 は、それぞれ粒径 0.030 cm および 0.066 cm を用いた場合の流速分布を濃度の小さい方から順に示したものである。図には実験条件とともに水位および粒子の存在する平均的な高さも示されている。まず、 $d=0.030\text{ cm}$ の $c=0.176\sim 0.249$ のデータを見ると移動床近傍を除いて上層の流れはかなり変動しており、土石流の流速分布とはかなり異なっているように見える。濃度の最も大きい $c=0.296$ のデータにおいては、移動床近傍において上に凸の土石流独特の分布形が形成されるようになる。これは粒径が小さい場合においても粒子濃度の大きい移動床近傍においては、エネルギー散逸機構あるいは流速分布の形成機構が粒子間摩擦や粒子間衝突あるいは粒子間隙水の変形速度に依存していることを示唆している。

このことは、 $d=0.066\text{ cm}$ の粒子を用いた場合の流速分布においてさらに顕著になる。すなわち、濃度の小さい $c=0.104$ のデータにおいてもすでに移動床近傍の流速分布形は典型的な土石流のそれに近いものになっている。

Fig. 3 は、濃度と粒径を一定にして、粒径による流速分布の変化を見たものである。 $d=0.017$ と 0.030 cm のデータにおいては、上層のデータはかなり乱れているが、 $d=0.066$ と 0.201 cm の分布形は、ほぼ全層にわたって土石流の分布に類似している。

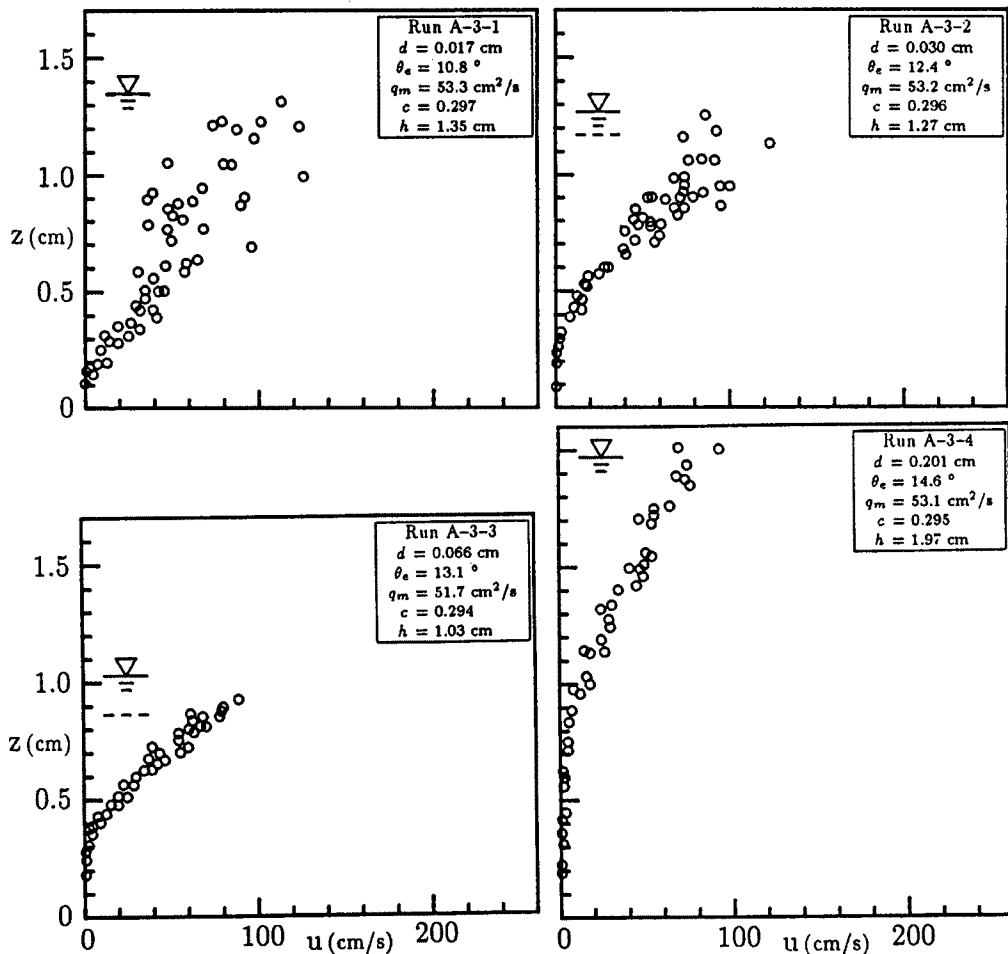


Fig. 3 Influence of particle size on the velocity profile.

3. 2層モデルとその適用

3.1 2層モデル

前述の実験結果によれば、流れの上層には乱流域が形成され、下層の粒子は層流的な挙動をしていることが推察される。このような鉛直方向の流れの遷移は連続的に起こるものと思われるが、ここでは流れの場を Fig. 4 に示すように模式化して問題を単純化しよう。すなわち、上層においてはレイノルズ応力が卓越し、下層においては粒子は層流運動をするものとし、江頭らの提案する応力³⁾が卓越するものとする。さらに、問題を単純化するため流れは等流とする。すると、上層および下層の運動量保存則はそれぞれ次のように書ける。

$h_2 \leq z \leq h$ (上層) において

$$\int_z^h \rho_m g \sin \theta dz = \tau(z) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\int_z^h \rho_m g \cos \theta dz = p_w(z) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $h = h_1 + h_2$ 、 ρ_m は混合物の密度、 $\tau(z)$ はレイノルズ応力、 $p_w(z)$ は砂粒子が浮遊している場合の静水圧である。

$0 \leq z \leq h_2$ (下層) において

$$\int_z^{h_2} \rho_m g \sin \theta dz + \tau(h_2) = \tau_y(z) + \tau_f(z) + \tau_g(z) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\int_z^{h_2} \rho_m g \cos \theta dz + p_w(h_2) = p_w(z) + p_s(z) + p_d(z) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\tau(h_2)$ 、 $p_w(h_2)$ はそれぞれ $z = h_2$ におけるせん断力および圧力である。 τ_y は降伏応力、 τ_f は間隙水の乱れや純粘性に起因する応力、 τ_g は粒子の非弾性衝突に起因する応力、 p_w は間隙水の圧力、 p_s は粒子の接触による静的な圧力、 p_d は粒子の衝突による圧力で、宮本¹¹⁾によれば衝突時に保存されるエネルギーから定められる。なお、式(4)、(5)において $\tau(h_2)$ 、 τ_y 、 $p_w(z)$ はそれぞれ次のようである。

$$\begin{cases} \tau(h_2) = \int_{h_2}^h \rho_m g \sin \theta dz \\ \tau_y(z) = p_s(z) \tan \phi_s \\ p_w(z) = p_w(h_2) + \int_z^{h_2} \rho g \cos \theta dz \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(6)を考慮して式(4)、(5)を変形すれば、

$$\int_z^h \rho \{ (\sigma/\rho - 1)c + 1 \} g \sin \theta dz = p_s(z) \tan \phi_s + \tau_f(z) + \tau_g(z) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\int_z^{h_2} \rho (\sigma/\rho - 1) c g \cos \theta dz = p_s(z) + p_d(z) \quad \dots\dots\dots (8)$$

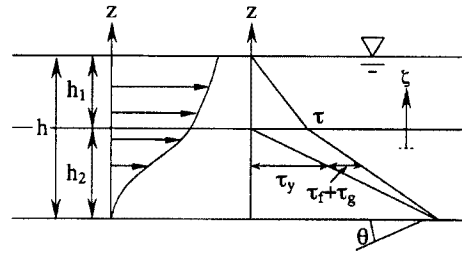


Fig. 4 Two-layer model.

以上が2層モデルの概要である。これによれば、粒子が層流的な運動をするものを土石流と定義すると、土石流の場合には

$$h_2 \rightarrow h \quad (h_1 \rightarrow 0)$$

のようになり、一般の浮遊砂流の場合には

$$h_1 \rightarrow h \quad (h_2 \rightarrow 0)$$

のようになる。これらの中間的な流れを泥流と定義することも可能である。

3.2 平衡河床勾配と流速分布

3.2.1 平衡河床勾配

式(7)の $\tau_f(z)$ 、 $\tau_\theta(z)$ はいずれも流動に伴って発生するせん断応力であり、式(8)の $p_d(z)$ は流動に伴って発生する圧力である。したがって、 $z=0$ 、すなわち河床面においては、前述の実験からも分かるように速度勾配が0となる。したがって、

$$\tau_f(0)=0, \quad \tau_\theta(0)=0, \quad p_d(0)=0$$

$c=\text{const.}$ として、式(7)、(8)を $z=0$ から積分すれば、それぞれ次式を得る。

$$\rho\{(\sigma/\rho-1)c+1\}g \sin\theta h = p_s(0)\tan\phi_s \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\rho(\sigma/\rho-1)cg \cos\theta h_2 = p_s(0) \quad \dots\dots\dots (10)$$

両式より濃度と平衡河床勾配との関係が次のように得られる。

$$\theta_e = \arctan \left\{ \frac{(\sigma/\rho-1)c}{(\sigma/\rho-1)c+1} \frac{h_2}{h} \tan\phi_s \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

上式は、流れの上層に乱流層 h_1 が形成されるために、式(1)のものよりも平衡河床勾配が小さくなることを示している。なお、前述のFig. 1の曲線群は式(11)による計算値で、 h_2/h をパラメータとして θ_e と c の関係を示している。

3.2.2 流速分布

式(7)、(8)において、 τ_f に江頭・芦田らの式³⁾および τ_θ 、 p_d に宮本の式¹¹⁾を適用すれば、粒子濃度が一定の場合の下層 ($0 \leq z \leq h_2$) の流速分布は容易に求められる。ちなみに、これらの応力は次のようであった。

$$\tau_f = k_f \rho \frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}} d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\tau_\theta = k_\theta \sigma (1-e^2) c^{1/3} d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$p_d = k_\theta \sigma e^2 c^{1/3} d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 ρ は水の密度、 d は粒子径、 σ は粒子の密度、 e は粒子の反発係数、 $k_f=0.25$ 、 $k_\theta=0.0828$ である。

ところで、式(12)は粒子によって囲まれた間隙の乱れによるエネルギー散逸 Φ_f を次のように評価して導かれている。

$$\Phi_f = \rho \bar{u}^{3/2} (1-c) / \ell \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\bar{u}' = \ell \frac{\partial u}{\partial z} \dots\dots\dots (16)$$

$$\ell = (\pi/6)^{1/3} (1-c)^{1/3} c^{-1/3} d \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 $\bar{u}'$ は乱れ強度、 ℓ は間隙の代表スケールである。しかし、その後の検討によって、粒子濃度が 40% よりも小さくなると、式(12)は少し大きめの抵抗を与えることが判明した。そこで、ここでは間隙の乱れ強度を次式のように修正する。

$$\bar{u}' = a' d \frac{\partial u}{\partial z} \dots\dots\dots (18)$$

式(16)の代わりに(18)を用いて Φ_f を再評価して τ_f を導き、さらに、粒子径が小さく、間隙スケールも小さくなることを考慮して純粘性応力を考慮すれば、 τ_f は次式のように求められる。

$$\tau_f = k_f \rho (1-c)^{2/3} c^{1/3} d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \rho \nu \frac{1-c}{1 - \left(\frac{6}{\pi} \right)^{1/3} c^{1/3}} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 ν は間隙水の動粘性係数である。右辺第 2 項については Einstein の有効粘性を用いている。

下層 ($0 \leq z \leq h_2$) の流速分布：以上の議論を踏まえて下層の流速分布を導く。式(8)および(14)より p_s は次のように表わされる。

$$p_s(z) = \rho(\sigma/\rho - 1)cg \cos\theta(h_2 - z) - k_\theta \sigma e^2 c^{1/3} d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \dots\dots\dots (20)$$

式(7)において、 p_s に式(20)、 τ_f に式(19)、および τ_θ に式(13)を適用すれば、流速 $u(z)$ に関する微分方程式が次のように得られる。

$$(f_f + f_\theta - f_d) d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \nu f_v \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) = \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\} g \sin\theta(h - z) - (\sigma/\rho - 1)cg \cos\theta \tan\phi_s(h_2 - z) \dots\dots\dots (21)$$

ここに、

$$\begin{aligned} f_f &= k_f (1-c)^{2/3} c^{1/3}, & f_\theta &= k_\theta (\sigma/\rho) (1-e^2) c^{1/3} \\ f_d &= k_d (\sigma/\rho) e^2 c^{1/3}, & f_v &= (1-c) / \{1 - (6/\pi)^{1/3} c^{1/3}\} \end{aligned}$$

ここで、 $z = h_2 z'$ 、 $u = \sqrt{gh_2} u'$ として式(21)を無次元化し、 $\partial u' / \partial z'$ について解けば、

$$\frac{\partial u'}{\partial z'} = -A_2 + \sqrt{A_2^2 + \frac{1}{A_1} \{A_3 - A_4(1-z')\}} \dots\dots\dots (22)$$

ここに、

$$\begin{aligned} A_1 &= f_f + f_\theta - f_d, & A_2 &= \frac{1}{2} \frac{f_v}{A_1} \frac{\nu}{d^2} \sqrt{\frac{h_2}{g}} \\ A_3 &= \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\} \frac{h_1}{h_2} \left(\frac{h_2}{d} \right)^2 \sin\theta \\ A_4 &= \left[(\sigma/\rho - 1)c \tan\phi_s - \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\} \tan\theta \right] \cos\theta \left(\frac{h_2}{d} \right)^2 \end{aligned}$$

移動床上の平衡状態の流れにおいては、前述の平衡勾配に関する議論からも明らかなように、 $A_3=A_4$ である。この関係を用いれば、式(22)は

$$\frac{\partial u'}{\partial z'} = -A_2 + \sqrt{A_2^2 + (A_3/A_1)z'} \quad \dots\dots\dots (23)$$

これより、下層における流速分布および断面平均流速 U_2 はそれぞれ次のように求められる。

$$\frac{u(z)}{\sqrt{gh_2}} = \frac{2}{3} \frac{A_1}{A_3} \left\{ \left(A_2^2 + \frac{A_3}{A_1} \frac{z}{h_2} \right)^{3/2} - A_2^3 \right\} - A_2 \frac{z}{h_2} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\frac{U_2}{\sqrt{gh_2}} = \frac{4}{15} \left(\frac{A_1}{A_3} \right)^2 \left\{ \left(A_2^2 + \frac{A_3}{A_1} \right)^{5/2} - A_2^5 \right\} - \frac{2}{3} \frac{A_1}{A_3} A_2^3 - \frac{1}{2} A_2 \quad \dots\dots\dots (25)$$

上層 ($h_2 \leq z \leq h$) の流速分布：この領域の流れには対数型流速分布則を適用する。いま、仮想原点より上向きに ζ 軸をとると速度勾配は次式のようなものである。

$$\frac{\partial u}{\partial \zeta} = \frac{u_{*1}}{\kappa \zeta} \quad \dots\dots\dots (26)$$

ここに、 κ はカルマン定数、 u_{*1} は $z=h_2$ あるいは $\zeta=\zeta_0$ (ζ_0 ：仮想原点からみた $z=h_2$ の座標) における摩擦速度である。 $\zeta=\zeta_0$ において上層の流速および速度勾配は下層のそれらに一致するという条件のもとで上式を解けば、

$$\frac{u(z)}{u_{*1}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z - h_2 + \zeta_0}{\zeta_0} + \frac{u(h_2)}{u_{*1}} \quad \dots\dots\dots (27)$$

ここに、

$$\frac{u(h_2)}{\sqrt{gh_2}} = \frac{2}{3} \frac{A_1}{A_3} \left\{ \left(A_2^2 + \frac{A_3}{A_1} \right)^{3/2} - A_2^3 \right\} - A_2$$

$$\zeta_0 = \frac{h_2}{\kappa} \frac{u_{*1}}{\sqrt{gh_2}} \frac{1}{\left\{ -A_2 + \sqrt{A_2^2 + A_3/A_1} \right\}}$$

$$u_{*1} = \sqrt{gh_1 \sin \theta}$$

また、この領域の断面平均流速 U_1 は次のようになる。

$$\frac{U_1}{u_{*1}} = \frac{1}{\kappa} \frac{\zeta_0}{h_1} \left\{ \frac{h_1 + \zeta_0}{\zeta_0} \left(\ln \frac{h_1 + \zeta_0}{\zeta_0} - 1 \right) - 1 \right\} + \frac{u(h_2)}{u_{*1}} \quad \dots\dots\dots (28)$$

以上、2層モデルにおける流速分布が導かれた。ただし、これらは砂粒子が上・下層とも一様に分布した状態のものである。粒子濃度の鉛直分布は、応力場に応じて規定されるものであり、これを議論するためには、粒子接触に伴う圧力 p_s に関する構成式が必要となる。

3.3 流速分布則の適用

上述の流速分布則を適用するにあたり、粒子濃度 c の代わりに輸送濃度を用い、平衡勾配 θ_e には実験値を用いる。また、層厚比 h_2/h は式(11)を用いて算定する。**Fig. 5** は、それぞれ $d=0.030$ cm および 0.066 cm を用いた実験に関する適用例を示したものである。計算に際し、モデルに含まれる係数には次のような値を用いた。 $k_f=0.52$, $k_g=0.0828$, $e=0.85$, $\phi_s=38.5^\circ$ 。なお、図には計算によって求められる水

深 h および下層厚 h_2 も示されている。

Fig. 5 の結果から分かるように、粒径 $d = 0.066$ cm に関しては両者はほぼ一致しているものの、 $d = 0.030$ cm のものについては計算値の方がかなり大きい流速を与えている。これについては二つの原因が考えられる。一つは、モデルにおいて下層のせん断力が小さく推定されている可能性がある。すなわち、粒子径が小さくなると流砂は浮遊しやすくなり、下層においても粒子間隙スケールよりも規模の大きい乱れがあり、これを無視し得ない可能性である。もう一つは、層厚比の決定法に起因する問題である。ここでは粒子濃度を一様として層厚比を算定しているが、**Table 1** に示すように、粒子は水面まで達しておらず、濃度も一様ではない。したがって、実際には計算に用いたものよりも下層の濃度は高く、しかも h_2 は小さくなっているはずである。どちらが主要な要因かを判断するには、濃度の鉛直分布を考慮した解析が必要である。

4. 結語と今後の課題

本研究においては、砂粒子と水との混合物の流れを対象として、流れの構造に及ぼす粒径の影響について検討した。得られた結果と今後の課題を要約すれば次のようである。

- (1) 平衡河床勾配に対する粒子径の影響は顕著であり、同一濃度の条件のもとでは、粒子径が小さいほ

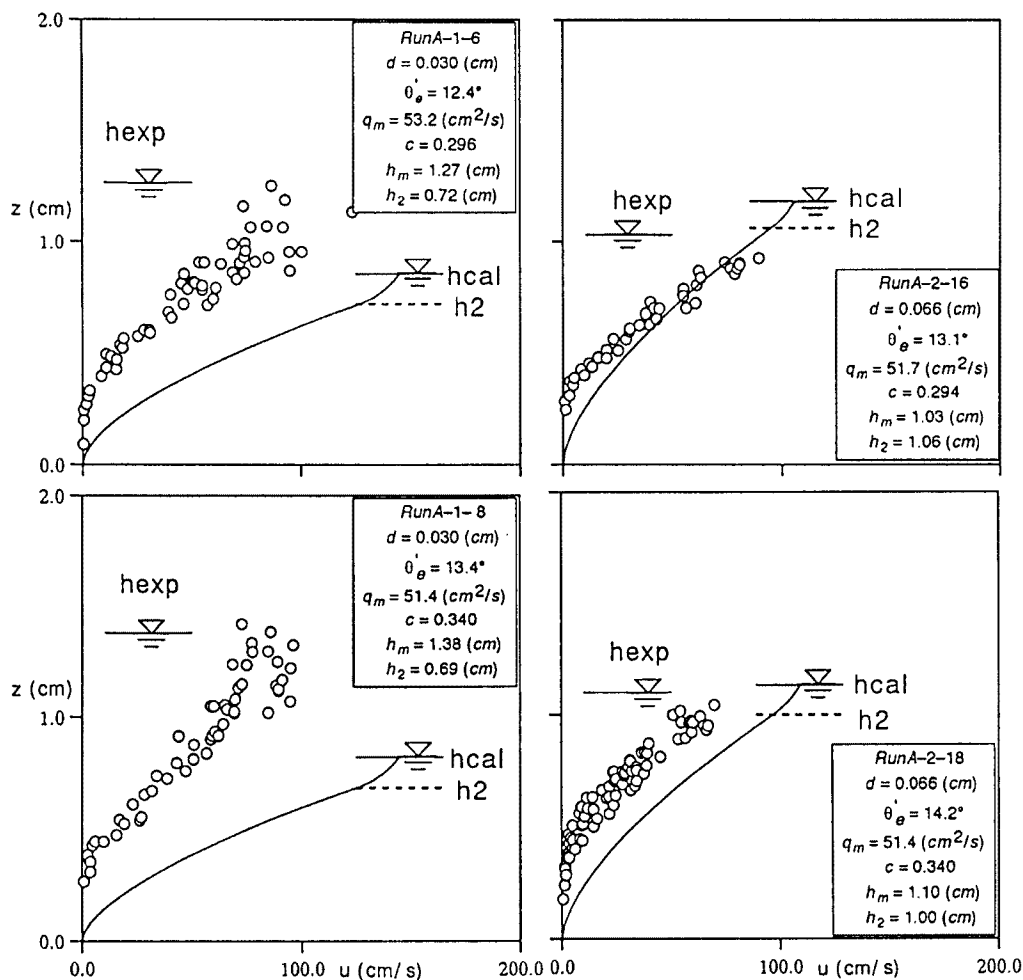


Fig. 5 Comparison of predicted and experimental results for velocity profiles.

ど勾配は小さくなる。これは、粒子径が小さくなると、流れの上層にクーロンの摩擦力の働かない乱流層が形成されるためである。

(2) 局所平均流速分布の構造においても上述のことが裏付けられた。すなわち、河床面近傍においては粒子が層流的な運動をする領域が形成されるが、上層には乱流層が形成される。下層の層流域は粒子径が大きいほど厚くなる。

(3) 平衡河床勾配および流速分布に関する結果に基づいて、二層モデルを提案した。これは、下層には粗い粒子を対象として導かれた土石流の構成則を適用し、上層の流れには対数型の流速分布則を適用するものである。このモデルに従って、平衡河床勾配と砂粒子濃度との関係を記述する式や流速分布式を導いた。

(4) 平衡河床勾配ならびに流速分布の推定式は、定性的には水路実験の結果を説明するものの、かなり不合理な面もみられた。その原因が応力構造にあるのか、用いた流速分布の条件にあるのかを明らかにする必要がある。

(5) 本研究が対象としている現象は、流速場と濃度場を同時に議論しない限り問題は閉じない。これを進展させるためには、粒子接触に伴う圧力 p_s の構造を明らかにすることが重要である。今後、これに関する議論を深め、土石流、泥流と一般の流砂現象との関連を明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 高橋 保：土石流の発生と流動機構，京大防災研究所年報，20号B-2，1977，pp.405-435.
- 2) 椿東一郎・橋本晴行・末次忠司：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文集，No.317，1982，pp.79-91.
- 3) 江頭進治・芦田和男・矢島 啓・高濱淳一郎：土石流の構成則に関する研究，京大防災研究所年報，32号B-2，1989，pp.487-501.
- 4) 志村博康：浮遊砂を有する水流の諸特性について，土木学会論文集，46号，1957，pp.22-29.
- 5) 日野幹雄：固体粒子を浮遊した流れの乱流構造の変化，土木学会論文集，92号，1963，pp.22-29.
- 6) Itakura, T. and T. Kishi：Open channel flow with suspended sediments, Proc. ASCE, Jour. Hydraulic Div., Vol.106, HY8, 1980, pp.1325-1343.
- 7) 新井宗之・高橋 保：泥流型土石流の流動機構，土木学会論文集，375号，1986，pp.69-77.
- 8) Winterwerp, J. C., De Groot, M. B., Mastbergen, D. R. and H. Verwoert：Hyperconcentrated Sand-Water Mixture Flows over Flat Bed, Jour. Hydr. Eng., Vol.116, No.9, 1990, pp.36-54.
- 9) 江頭進治・芦田和男・田野中新・佐藤隆宏：微細砂を高濃度に含む流れの特性，水工学論文集，1993，pp.517-522.
- 10) 江頭進治・佐藤隆宏・千代啓三：泥流の応力構造に関する研究，火山災害の規模と特性（研究代表者 荒巻重雄），文部省科研費，重点領域研究，No.A-4-5，1993，pp.241-249.
- 11) 宮本邦明：Newton 流体を含む粒子流の流動機構に関する研究，立命館大学学位論文，1985，pp.39-72.
- 12) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム(1)，新砂防，Vol.46, No.1, 1993，pp.45-49.