

泥流に関する研究

— 応力構造 —

江頭 進治・芦田 和男・田野中 新・佐藤 隆宏

STUDIES ON MUD FLOW

— Stress Structure —

By *Shinji* EGASHIRA, *Kazuo* ASHIDA, *Shin* TANONAKA and *Takahiro* SATO

Synopsis

The flow characteristics of fine sands and water mixture is discussed in terms of experimented results concerning the flow resistance, sediment concentration profiles and sediment diffusion. (1) Flow resistance does not change so much in the range of sediment concentration less than 10 percent by volume, but increases gradually and then rapidly with increase of the sediment fraction. (2) The profiles of sediment concentration can be evaluated well by Rouse's formula in the low range of sediment fraction. These tend to be uniform when the sediment fraction increases. (3) Turbulent diffusion coefficients of tracer particles decrease almost linearly with increase of sediment fraction. These facts indicate that some stresses except Reynolds ones dominate above the range of general open channel flows with suspended loads.

1. 緒 言

土石流や泥流は一般に豪雨、火山噴火、地震などに伴って発生する。その規模が大きい場合には、侵食・堆積作用によって移動径路に大きな地形変化をもたらすばかりでなく、大災害を引き起こすこともある。そのため、その流れは多くの分野の研究者・技術者の興味の対象となっており、これまでに各分野において多くの研究成果が発表されている。これらの研究によれば、現状においては土石流と泥流を力学的に明確に区別することは難しく、水と土砂の混合物の流れのうち、石礫分の少ない、いわゆる泥っぽい流れが泥流と呼ばれている。

泥流の流れの構造に着目した研究についてみると、粘土・シルトなど固体粒子間の界面力が応力に対して重要なファクターとなるものから非粘着性とみなされる微細砂、砂の範囲を扱ったものなどがある。前者、すなわち、粘土・シルトと水との混合物の流れについては、ビンガム流体モデルを対象とし、降伏応力や粘性係数が粒子濃度や粒子径とどの様な関数関係になるかを求めるための実験的研究が多い(大同¹⁾, O'Brien et al²⁾)。こうした中で、芦田・宮本³⁾らは、電気2重層の概念を用いて粒子同士の結合力を評価し、せん断にとまなう結合の切断エネルギーに基づいて降伏応力や粘性係数の表示式を導いている。

一方、粒子径が0.1 mmよりも大きい非粘着性材料と水との混合物の流れについては、著者の知る限り、水工学分野でなじみの深い開水路浮遊砂流の延長上の研究が多い。すなわち、流速分布として対数型の壁法則を基準として流れの構造を調べようとするものである。Winterwerp⁴⁾らは、粒径0.12 mm~0.225 mm

の砂を用いた開水路実験により、乱れの混合距離は濃度の増加とともに一旦減少した後、再び増加するという結果を示している。新井・高橋⁹⁾は、せん断応力はレイノルズ応力と粒子衝突による応力の和からなると仮定し、前者にはプランドルの混合距離 ($l=\kappa z$) を用い、後者にはバグノルドの衝突応力を適用して流速分布を導くとともに、粒径 0.099 mm ~ 0.99 mm の砂を用いた開水路実験により流れの構造を調べている。それによれば、乱れの混合距離は濃度とともに減少した後、わずかに増加するようである。

上述の二つの研究は、従来の浮遊砂流の研究にみられるように、ある濃度の範囲までは乱れの混合距離は減少するが、濃度がさらに増加すると再び増加するという結果を示している。しかし、何故そうなるのかについては納得のいく答えは与えられていない。本研究においては、このような見かけ上のカルマン定数の変化、あるいは流れの抵抗変化は応力構造の変化に起因するものと考え、粒径 0.16 mm の砂を用い、従来の浮遊砂流の領域から粒子体積濃度が 30% 程度までの領域を対象にして、流速分布、濃度の鉛直分布、粒子拡散係数等に関する水路実験を行ない、これらの結果に基づいて流れの構造を検討する。

2. 実験およびその結果の一覧

Fig. 1 は、泥流を作るために用いた微細砂の粒度分布を示している。中央粒径は 0.16 mm、比重 2.63 である。実験用水路は、幅 10.5 cm、長さ 4.0 m の可変勾配のもので、側壁は片面ガラス張り、一方はアクリライト製である。水路床には上述の微細砂が張り付けられている。水路上流側には、水と微細砂を混合攪拌するための混合槽があり、ここへ微細砂を供給するための給砂器 (ホッパー型) や水を供給するための定水頭タンク等がある。水と微細砂は、混合槽へ独立に供給され、一様に攪拌された後、水路へ供給される。

実験の種類は 4 種類であり、それぞれ泥流の流れの抵抗、流速分布、濃度の鉛直分布および粒子拡散に関するものである。

粒子濃度による流水抵抗の変化を調べるための実験は、勾配 $\theta=7.0^\circ$ のもとの、清水の流量 q_w と微細砂の供給量 q_s との和をほぼ一定にして、かつ所定の粒子濃度が得られるよう q_w と q_s を調節しながら行なわれた。粒子輸送体積濃度の範囲は 0 ~ 30% である。流動深はポイントゲージを用いて測定された。実験の条件と結果の一部を Table 1 に示している。ここに、 q_m : 混合物の単位幅流量で $q_m=q_w+q_s$ 、 c : 粒子輸送体積濃度 $c=q_s/(q_s+q_w)$ 、 h : 水深、 h/h_0 : 同一流量における泥流と清水流との水深比、 κ : カルマン定数である。これは、対数型流速分布において、相当粗度を清水流の実験から求め、さらに、 $A_r=8.5$ として逆算されたものである。なお、 $c=0.0$ の実験は、清水流に関するものであり、以下、添字の 0 は全て清水流の値である。

流速分布および粒子拡散に関する実験は、上述の方法で泥流を流し、さらにトレーサーとして粒径 1.0 mm、比重 1.43 のスラッジライトを混入し、これを水路側面よりハイスピードビデオカメラを用いて撮影するような方法で行った。実験条件を Table 2 に示している。ここに、 u_* : 摩擦速度 ($=\sqrt{gh \sin \theta}$)、 U は断面平均流速である。本表に示すように、勾配はいずれも 7° 、単位幅流量はおおよそ 130 cm^2/s 、粒子輸送濃度は 0.091 ~ 0.251 の範囲である。これらの実験ケースのうち、Run B-1、B-4、B-5 および B-6 については、時々刻々のトレーサーの動きを追跡して、それらの結果に基づいて

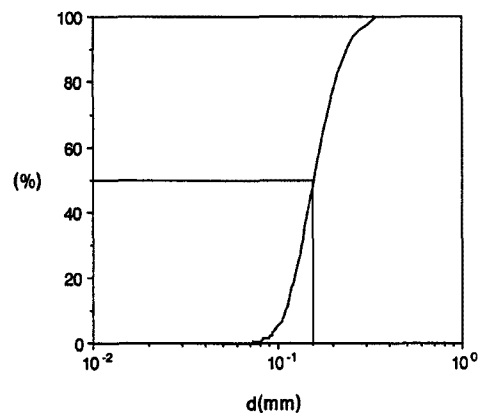


Fig. 1. Particle size distribution employed in the flume tests.

Table 1. Experimental quantities for the flow resistance

Run No.	θ	q_m	q_w	q_s	c	h	h/h_0	k	k/k_0	f	Fr	k_s
	deg.	cm ² /s	cm ² /s	cm ² /s		cm						cm
A-3-1	7.0	124.0	124.0	0.0	0.000	1.00	1.000	0.40	1.000	0.061	3.99	0.113
A-3-2	7.0	124.2	118.4	5.8	0.047	0.99	0.995	0.39	0.975	0.060	4.03	
A-3-3	7.0	124.4	105.3	14.4	0.116	0.96	0.965	0.32	0.800	0.055	4.22	
A-3-4	7.0	124.3	105.1	16.0	0.129	1.00	1.000	0.40	1.000	0.061	4.00	
A-3-5	7.0	122.8	100.6	21.2	0.172	0.99	0.995	0.40	1.000	0.061	3.98	
A-3-6	7.0	121.5	92.0	28.3	0.233	1.08	1.085	0.90	2.250	0.082	3.46	
A-3-7	7.0	125.9	85.5	36.8	0.292	1.28	1.286	-2.62	-6.550	0.126	2.78	
A-4-1	7.0	128.1	128.1	0.0	0.000	1.02	0.995	0.40	1.000	0.061	4.00	0.114
A-4-2	7.0	128.5	121.6	5.7	0.044	1.04	1.020	0.47	1.175	0.065	3.87	
A-4-3	7.0	128.4	114.9	12.8	0.099	1.05	1.029	0.50	1.250	0.067	3.81	
A-4-4	7.0	126.6	106.6	19.2	0.152	1.04	1.015	0.48	1.200	0.066	3.84	
A-4-5	7.0	128.2	105.3	26.2	0.204	1.03	1.010	0.44	1.100	0.064	3.92	
A-4-6	7.0	127.6	96.8	33.2	0.260	1.14	1.113	1.12	2.800	0.086	3.37	
A-4-7	7.0	126.0	89.6	35.0	0.278	1.27	1.240	-3.54	-8.850	0.122	2.83	

Table 2. Experimental quantities for the velocity profile and dispersion of tracer particle

Run No.	θ	q_m	q_w	q_s	c	h	u_s	U	Fr	k_s
	deg.	cm ² /s	cm ² /s	cm ² /s		cm	cm/s	cm/s		cm
B-1	7.0	131.7	119.8	11.9	0.091	1.05	11.17	126.0	3.94	0.115
B-2	7.0	129.9	108.9	21.0	0.162	1.03	11.09	126.1	3.97	
B-3	7.0	126.9	103.4	23.5	0.185	1.03	11.09	123.2	3.88	
B-4	7.0	127.7	100.7	27.1	0.212	1.12	11.57	114.1	3.44	
B-5	7.0	132.8	101.9	31.0	0.233	1.10	11.46	120.8	3.68	
B-6	7.0	132.4	99.2	33.2	0.251	1.14	11.67	116.2	3.47	

Table 3. Experimental quantities for the sediment concentration distribution

Run No.	θ	q_m	q_w	q_s	c	c_0	h	U	Fr
	deg.	cm ² /s	cm ² /s	cm ² /s			cm	cm/s	
C-1	3.0	129.3	129.1	0.2	0.002	0.031	1.23	105.1	3.03
C-2	7.0	128.1	126.1	2.0	0.016	0.044	1.04	123.2	3.86
C-3	3.0	127.2	125.1	2.1	0.016	0.095	1.23	103.4	2.98
C-4	7.0	129.4	121.9	7.5	0.058	0.114	0.98	132.1	4.26
C-5	7.0	128.2	116.7	11.5	0.090	0.211	1.03	124.4	3.92
C-6	7.0	128.2	107.5	20.7	0.162	0.233	1.01	127.0	4.04
C-7	7.0	129.4	106.8	22.5	0.174	0.279	1.03	125.6	3.95
C-8	7.0	129.2	103.6	25.7	0.199	0.318	1.02	126.7	4.01
C-9	7.0	127.5	99.7	27.7	0.218	0.298	1.04	122.6	3.84

粒子拡散係数を求めている。

濃度の鉛直分布に関する実験は次のように行われた。すなわち、内径2mm、外径3mmのステンレス製円管のみ口を鉛直方向に千鳥状に配して、水路床から高さ1mmごとの位置で採水できるような装置を作り、これを長さ1mの水路に取り付け、この水路を前述の4mの水路の下流端に設置して、各々の位置から

同時に鉛直下方へ採水するような方法で行われた。実験条件を Table 3 に示す。水路勾配は 3° および 7° で、粒子輸送濃度の範囲は、0.2% から 22% であり、通常の浮遊砂流の条件をカバーしている。本表において c_a は、河床から 1 mm の高さにおいて測定された粒子濃度である。

3. 浮遊砂流に関する研究成果の適用性

開水路浮遊砂流に関する研究は、1950年代から1960年代にかけてかなり活発に行われ、乱れの混合距離について多くの研究成果が得られている。ここでは、乱れの混合距離については志村の研究⁶⁾を適用し、濃度の鉛直分布については Rouse 分布を適用してみよう。なお、志村によればカルマン定数は次式で与えられる。

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{1}{\kappa_0} + \frac{\beta_1 \bar{c} (\sigma/\rho - 1) g w_0 (h - \delta)}{u_*^3 (2.3 \log_{10} h/\delta - 1)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 κ : 浮遊砂流のカルマン定数、 κ_0 : 清水流のカルマン定数、 β : 係数 ($\beta = 4.8$)、 σ : 粒子の密度、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 w_0 : 粒子沈降速度、 h : 水深、 δ : 粘性底層厚、 u_* : 摩擦速度である。また、Rouse 分布は次式のものである。

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{a}{h-a} \frac{h-z}{z} \right)^2, \quad Z = \frac{w_0}{\beta \kappa u_*} \dots\dots (2)$$

ここに、 c_a : 基準点濃度、 a : 河床面からの基準点の高さ、 β : 比例係数である。

Fig. 2 は、Run A-3 のシリーズの実験に対して式(1)を適用して得られるカルマン定数、およびそれに関する実験値を示したものである。同図には流量 q_m の少し異なる Run A-4 のデータも示されている。式(1)の適用に当たり粘性底層厚 δ には、Table 2 に示す清水流の相当粗度 k_s を用いている。Fig. 2 の結果によれば、粒子濃度が 10 数% を越えない範囲では、両者には大きな差異はないが、粒子濃度がこれ以上になると、実験値は急激に増加する。

Fig. 3 は、カルマン定数の変化にともなう水深変化と実験データとを比較したものである。水深に関する計算は、対数則において $A_r = 8.5$ とし、 k_s には Table 2 の清水流の値を用い、カルマン定数には式(1)から求められるものを用いて行われている。したがって、Fig. 3 の結果は Fig. 2 のものと同じ意味を持っている。図示の結果が示すように、実験値において、水深は粒子濃度が 10 数% までは顕著な変化を示さないが、これがさらに増加すると急激に増加する。これに対し、計算値は濃度の増加とともに漸減している。

Fig. 2 および Fig. 3 に示す実験値の傾向は次のようなことを物語っている。もし、対数則が適用できるものとしたとき、粒子濃度がある値を越えると、乱れに伴うエネルギー

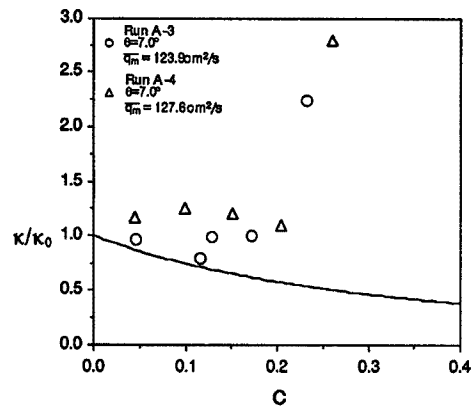


Fig. 2. Relation between Karman constants and sediment concentration. The solid line is predicted in terms of Eq.(1) developed by Shimura.

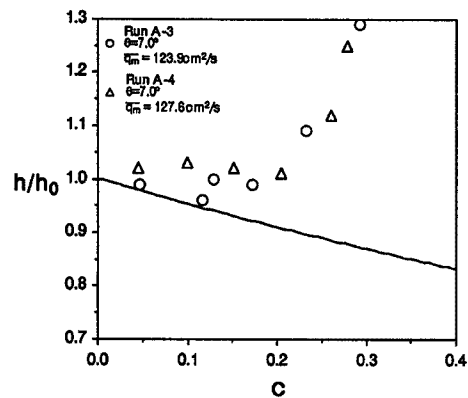


Fig. 3. Relation between flow depths and sediment concentrations. The solid line is predicted in terms of logarithmic friction law with Eq.(1).

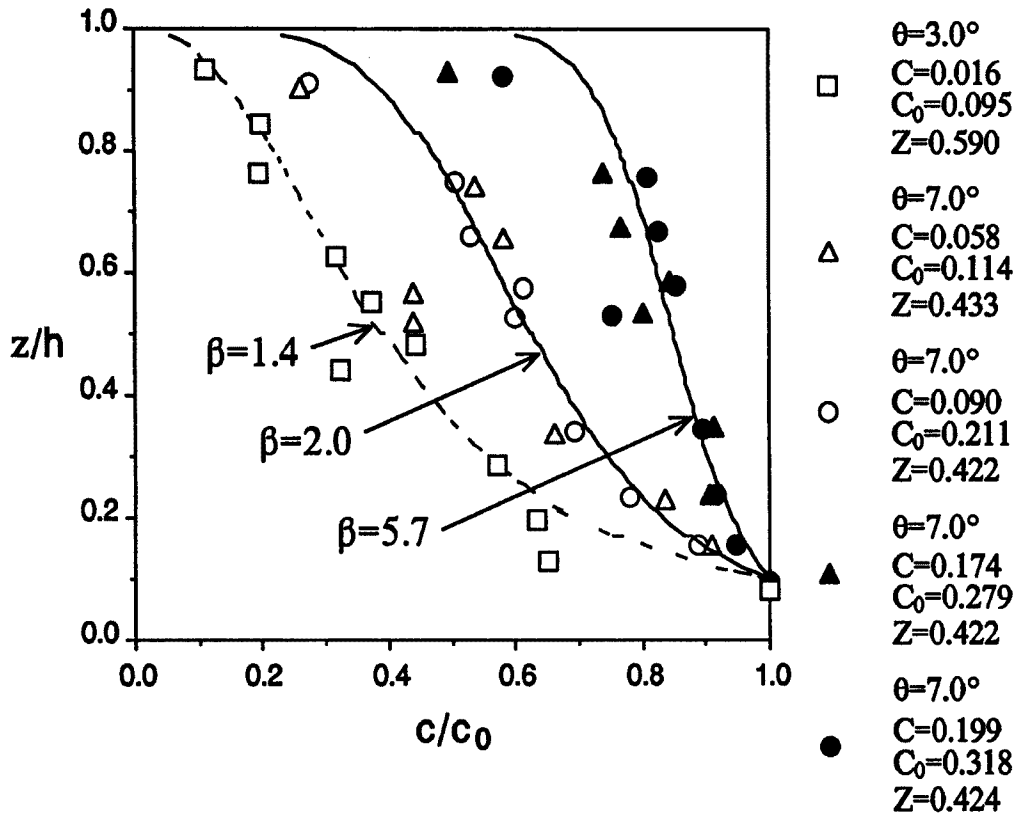


Fig. 4. Profiles of sediment concentrations calculated with Rouse's formula (Eq. 2).

ギー散逸が清水流のものより大きくなり、その結果流れの抵抗が増加する。後述するように、はたして現象がそのようになっているかが大きな問題である。

Fig. 4は、濃度の鉛直分布に関し式(2)と実験値を示したものである。図中の濃度分布に関する三つの曲線は、Table 3のRun C-3, C-5, C-7に対応するものであるが、それぞれ $\kappa=0.4$ とし、さらに、比例定数 β を実験値に適合するように定めて算定されている。これによれば、粒子濃度が小さいものはRouse分布に従い、粒子濃度が大きいものはこれから外れ、それに一致させるためには比例係数 β をかなり大きくとる必要がある。これは、粒子濃度が大きい領域において、その鉛直分布をRouse分布で表現するためには粒子拡散係数をかなり大きくとる必要があることを意味している。なお、図の右端に示す Z の値は、データがRouse分布に一致するようにしたときのものである。

4. 流れの構造

4.1 粒子拡散からみた流れの構造

前章において、粒子濃度が10数%を越えると、流れの抵抗は通常の清水流や浮遊砂流のものよりも大きくなり、かつ、濃度の鉛直分布は濃度の増加にともない一様化する傾向を示すことが判明した。壁法則を前提とすれば、その原因としてレイノルズ応力が通常の開水路流に比べて大きくなることなどが考えられる。はたしてそうか、粒子拡散係数に関するデータ解析に基づき検討しよう。

Fig. 5 (a), (b), (c) はそれぞれ Run B-1, B-4, B-5 においてトレーサー粒子を 1/250 秒ごとに追跡したものである。図中の z の値は、粒子の追跡開始時点における河床面からの高さであるが、ここでは粒子の拡散係数を調べるため、各粒子の追跡開始時点の高さを同じ位置 ($z=0$) にして描いている。これによれば、粒子濃度が大きいものほどトレーサー粒子の分散は小さくなり、層流的な運動に近づくことが分かる。そこで、乱れの一様性を仮定し、Fig. 5 の包絡線の広がり幅に基づいて拡散係数を求めてみよう。計算式は、次のようである。

$$D = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \overline{Y^2} = \frac{1}{2} U \frac{d}{dx} \overline{Y^2} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 D : 粒子拡散係数, U : 断面平均流速, \overline{Y} : 包絡線の幅である。

Fig. 6 は、上述のようにして求められる拡散係数と粒子濃度の関係を示している。同図において拡散係数は摩擦速度および水深を用いて無次元化されており、 $c=0$ のデータは、通常よく用いられる開水路清水流の断面平均値 $D/u_*h = \kappa/6$ ($\kappa=0.4$) である。ほかのデータは、トレーサー濃度がガウス分布に従うものとして、 $\overline{Y} = 2\sigma$ (σ : 標準偏差) として求められている。同図より明らかなように、粒子濃度が増加すると拡散係数はほぼ直線的に減少している。

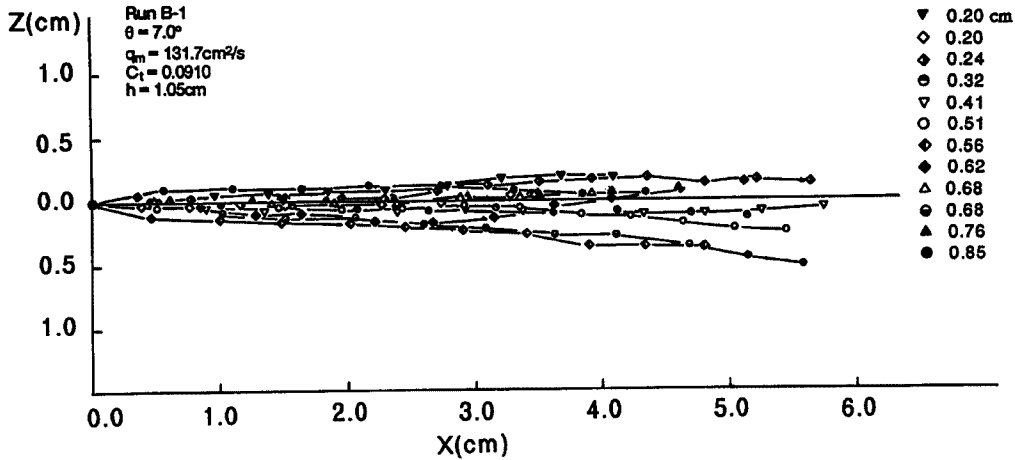


Fig. 5(a). Dispersion process of tracer particles.

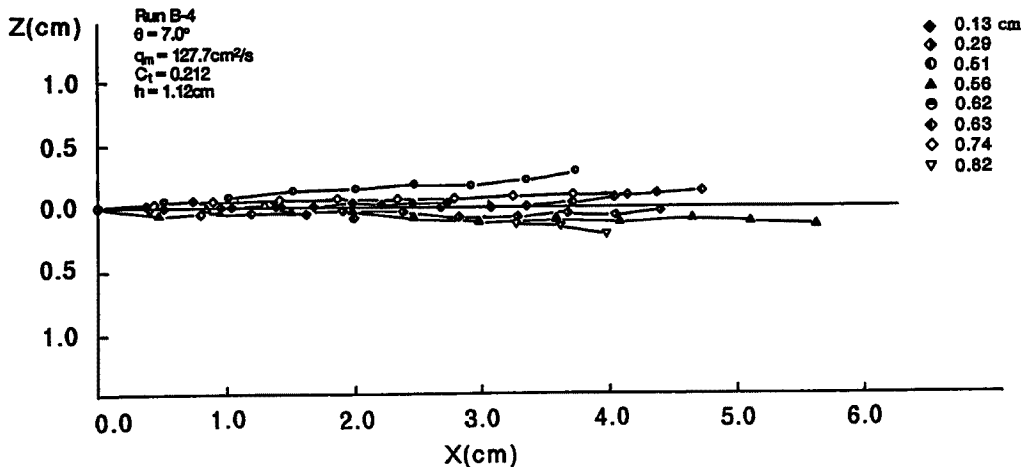


Fig. 5(b). Dispersion process of tracer particles.

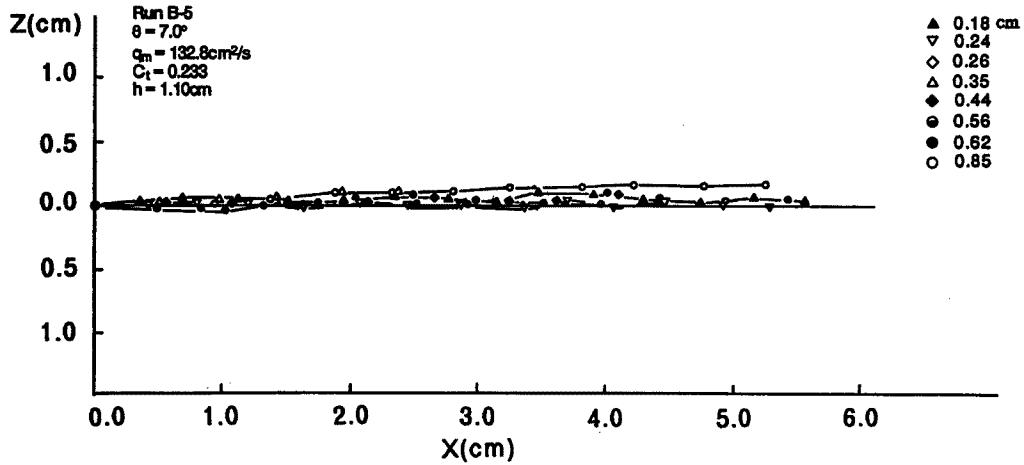


Fig. 5(c). Dispersion process of tracer particles.

流れの抵抗としてレイノルズ応力が卓越するという前提に立つと、Fig. 6の結果と粒子濃度の増加にともなう濃度分布の一樣化の傾向とは矛盾する。また、前述したように従来の浮遊砂流の理論では流れの抵抗を説明できない。このことは、粒子濃度が高くなるにともないレイノルズ応力以外の何らかの応力が支配的になることを示唆している。

4.2 降伏応力を考慮した流れの解析

流れの抵抗や粒子濃度分布がどんな応力構造に支配されているかは、今後の課題として残し、ここではその手掛かりをつかむため、江頭ら⁷⁾による土石流のモデルに導入されている降伏応力の概念を用いた場合、流れの抵抗がどのようになるのか調べてみる。

せん断応力として次式を仮定する。

$$\tau = \tau_y + \tau_w \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 τ_y ：降伏応力、 τ_w ：レイノルズ応力である。降伏応力として江頭らのものを用い、 τ_w にはブランドルの混合距離 l を用いれば、これらはそれぞれ次式のように与えられる。

$$\tau_y = \frac{1}{1+\alpha} \rho g h \cos \theta \tan \phi_s \int_z^h \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c dz \dots\dots\dots (5)$$

$$\tau_w = \rho_m l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \frac{\partial u}{\partial z} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 ρ ：水の密度、 σ ：砂粒子の密度、 ϕ_s ：砂粒子の静摩擦角、 c ：砂粒子の体積濃度、 h ：水深、 z ：河床面からの高さである。 ρ_m は水と砂粒子の混合物の密度で $\rho_m = \rho \{ (\sigma/\rho - 1)c + 1 \}$ である。また、 α は粒子の動的な圧力と静的な圧力との比で、土石流の場合には $\alpha = 0.25$ 程度である。一方、外力のせん断応力は、

$$\tau = \rho g \sin \theta \int_z^h \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c + 1 \right\} dz \dots\dots\dots (7)$$

いま、 $c = \text{一定}$ として、式(5)、(6)、(7)を式(4)に代入し、さらに $l = \kappa_0 z$ とすれば、速度勾配、流速分布

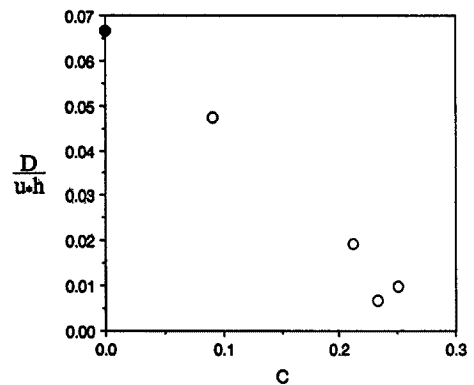


Fig. 6. Diffusion coefficients of tracer particles vs. sediment concentration.

$u(z)$ ならびに断面平均流速 U がそれぞれ次のように得られる。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \left\{ 1 - \frac{1}{1+\alpha} \frac{\rho}{\rho_m} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c \frac{\tan \phi_s}{\tan \theta} \right\}^{1/2} \frac{u_*}{\kappa_0 z} \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{u}{u_*} = A_r + \left\{ 1 - \frac{1}{1+\alpha} \frac{\rho}{\rho_m} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c \frac{\tan \phi_s}{\tan \theta} \right\}^{1/2} \frac{1}{\kappa_0} \ln \frac{z}{k_s} \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{U}{u_*} = A_r - \left\{ 1 - \frac{1}{1+\alpha} \frac{\rho}{\rho_m} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c \frac{\tan \phi_s}{\tan \theta} \right\}^{1/2} \frac{1}{\kappa_0} \left(1 - \ln \frac{h}{k_s} \right) \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 A_r , k_s は積分定数で、対数則の場合には $A_r = 8.5$, k_s は相当粗度である。 u_* は摩擦速度で $u_* = \sqrt{gh \sin \theta}$ のように定義されている。いま、Fig. 2 に示したように、流れの抵抗変化を形式的にカルマン定数に押し込み、それを κ とすれば、これは次式のように求められる。

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = \left\{ 1 - \frac{1}{1+\alpha} \frac{\rho}{\rho_m} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c \frac{\tan \phi_s}{\tan \theta} \right\}^{-1/2} \dots\dots\dots (11)$$

上述の式(8), (9) および (10) を用いて算定される流速分布、水深、流速係数 (平均流速) および見かけのカルマン定数と実験値をそれぞれ Fig. 7 ~ 10 に示している。計算では清水流の値 $\kappa_0 = 0.4$, $A_r = 8.5$, $k_s = 0.114$ cm を用いている。Fig. 10 以外の計算では、乱れの混合距離は変化しないものとして算定されているため、濃度の小さいところで、流れの抵抗が実験値よりも大きく算定されているものの、流速分布、水深等に関する両者の傾向は一致している。

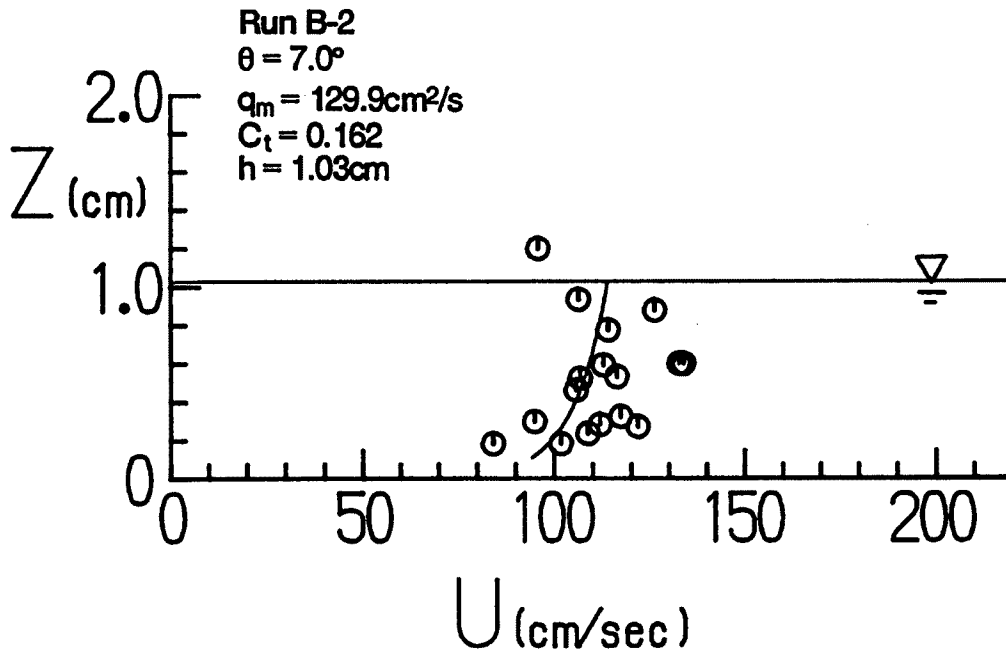


Fig. 7. Velocity profile calculated with Eq.(9) and exmerimental data.

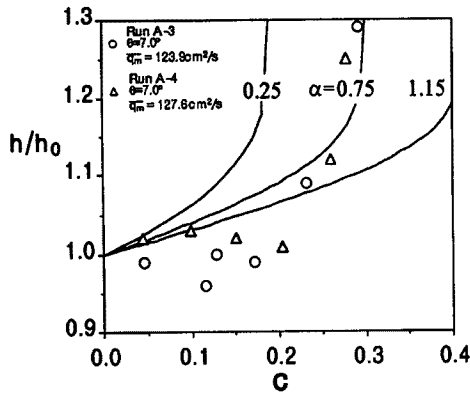


Fig. 8. Flow depths calculated with Eq. (10) and experimental data.

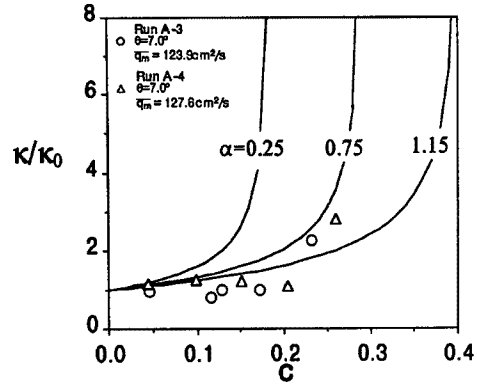


Fig. 9. Apparent Karman constants calculated with Eq. (11) and experimental data.

5. 結 語

中央粒径 0.16 mm の微細砂と水との混合物の流れに関する開水路実験を行ない、流れの抵抗、粒子濃度の鉛直分布、粒子拡散係数等を測定し、これらの結果に基づいて泥流の応力構造を推察した。以下、本研究によって得られた成果と今後に究明すべき問題点を要約する。

(1) 粒子体積濃度が 0～10% の範囲においては、流水抵抗は顕著に変化しないが、これが 10 数% を越えるとかなり急激に増加する。

(2) 粒子濃度が 0～10% の範囲においては、粒子濃度の鉛直分布は、Rouse 分布に従うが、濃度がさらに増加すると、一様化する傾向を示す。濃度の大きい領域における分布形を Rouse 分布で表現するためには、粒子拡散係数をかなり大きくとる必要がある。

(3) 壁法則に従う開水路乱流の立場からみると、上述の (1) および (2) の結果は、濃度が 10 数% を越えると乱れの混合距離、あるいはレイノルズ応力が急激に増加することを意味するものである。しかし、トレーサー粒子の拡散に関する実験によれば、それとは逆に、粒子濃度の増加に伴って拡散係数は減少することを示している。

(4) 以上の結果は、粒子濃度が増加するとレイノルズ応力は減少するが、これに代わる何らかの応力が卓越することを示している。試算によればこの応力は、従来の非弾性衝突による散逸応力や Bagnold の衝突応力よりもかなり大きい。

(5) 粒子濃度の増加に伴う抵抗増加を表現するモデルとして、従来の壁面乱流モデルに降伏応力を加えた応力モデルを考え、これを用いて泥流の流速分布や流動深等に関する解析を行なった。それによれば、粒子濃度による流れの抵抗変化などかなりよく説明できるが、降伏応力の決定機構が大きな課題として残される。

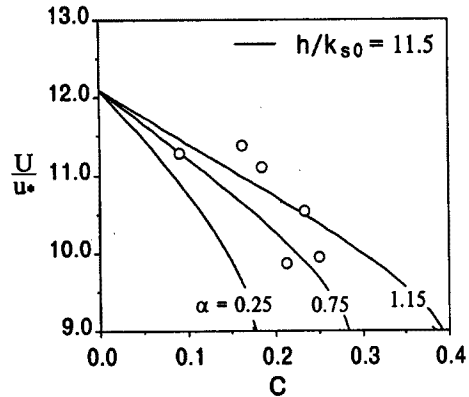


Fig. 10. Velocity factors calculated with Eq. (10) and experimental data.

最後に、本研究は一部、文部省科学研究費、重点領域研究 自然災害（代表者 荒牧重雄 北大教授）の補助のもとに進められていることを記し、ここに感謝いたします。本研究で行ったトレーサー粒子の追跡は、近畿大学江藤剛治教授のグループで開発された高速・高感度ビデオ装置を用いて行った。この装置を心よく貸して下さった江藤先生に対して深く感謝いたします。

なお、本研究のテーマについては、コロラド州立大の Dr. Julien と種々議論している。また、京大防災研究所吉田義則技官には水路実験等で種々ご協力頂いた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Daido, A.: On the Occurrence of Mud-debris Flow, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol.21, part 2, 1971.
- 2) O'brien, J.S. and Julien, P.Y.: Laboratory Analysis of Mudflow Properties, Jour. Hydr. Eng. Vol.114, No.8, 1988, pp.877-887.
- 3) 芦田和男・山野邦明・神田昌幸：高濃度流れに関する研究（2）—流動機構—, 京大防災研究所年報, No.29 B-2, 1986, pp.361-375.
- 4) Winterwerp, J.C., de Groot, M.B., Mastbergen, D.R. and Verwoert, H.: Hyperconcentrated Sand-Water Mixture Flows over Flat Bed, Jour. Hydr. Eng., Vol.116, No.9, 1990, pp.36-54.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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, No.32 B-2, 1989, pp.487-501.