

微細砂を高濃度に含む流れの特性 Characteristics of High Concentrated Sediment Laden Flow

江頭進治*・芦田和男**・田野中新***・佐藤隆宏****

By Shinji Egashira, Kazuo Ashida, Shin Tanonaka and Takahiro Sato

The flow characteristics of fine sands and water mixture is discussed in terms of experimental results on the flow resistance, sediment concentration profile, sediment diffusion and equilibrium bed slope. (1) Flow resistance does not change representatively in the range of sediment concentration below ten and several percent by volume, but increases gradually and then rapidly with increase of sediment fraction. (2) When sediment fraction increases over ten percent, the sediment distribution profile tends to be uniform. (3) Turbulent diffusion coefficients of tracer particles decreases almost linearly with increase of sediment concentration, and then, some stresses such as yield stress instead of Reynolds ones dominate gradually.

Keywords: sediment laden flow, mud flow, flow resistance, stress structure

1. 緒言

浮遊砂流、土石流、泥流等に関する従来の研究によれば、固体粒子と水との混合物の流れは、粒子の密度、粒度分布、粒子濃度に強く依存することが知られている。しかし、流れの構造がこれらのパラメーターにどのように依存するのか混沌とした部分がある。

いま、非粘着性の微細砂と水との混合物の流れについてみてみよう。一般の浮遊砂流の領域においては、粒子濃度の増加に伴いプランドルの混合距離あるいは渦のスケールは減少し、その結果、流れの抵抗も減少することが知られている。^{1),2)} 粒子濃度がさらに増加すると、流れの構造はどのように変化するのか。新井・高橋³⁾やWinterwerp, et al⁴⁾は、対数型流速分布則を基準としてこのような流れを検討し、渦のスケールは濃度の増加に伴い一旦減少するものの、再び増加すると報告している。しかし、渦のスケールが何故このような変化を示すのか判然とした答えは得られていない。

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611 宇治市五ヶ庄)

** 正会員 工博 京都大学名誉教授 河川環境管理財団

*** 正会員 工修 三菱総合研究所

**** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科

本研究は、一般の浮遊砂流から高濃度の領域を対象として、流れの構造を統一的に理解することを目的としたものであって、微細砂濃度が0~30%の範囲において開水路実験を行い、その結果に基づいて、流れの抵抗、濃度の鉛直分布、粒子拡散係数および平衡河床勾配について検討し、示唆に富んだ興味深い結果を得ている。ここではこれらについて報告するとともに、これらを基に流れの構造を考察する。

2. 実験およびその結果の一覧

実験に用いた微細砂の粒度分布を図-1に示している。中央粒径は0.16mm、比重は2.63、静摩擦角 ϕ_s は39.0°である。実験水路は、幅10.5cm、長さ4.0m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性である。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、それぞれ流れの抵抗、粒子濃度の鉛直分布、粒子拡散および平衡勾配に関するものである。

流水抵抗の実験は、勾配 $\theta = 7.0^\circ$ のもとで、清水の流量 q_w と微細砂の供給量 q_s との和がほぼ一定で、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表-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 :同一流量における清水流との水深比。 $c = 0.0$ 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。

粒子拡散に関する実験は、上述の方法で流れを作り、さらにトレーサーとして粒径1.0mm、比重1.43（乾燥状態）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

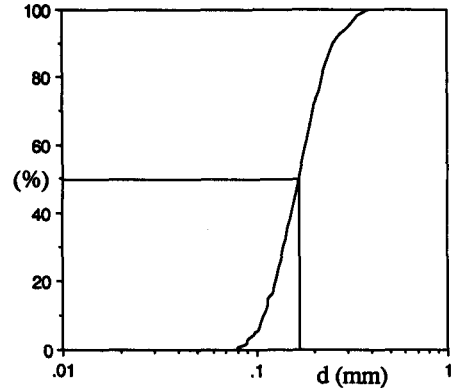


図-1 微細砂の粒度分布

表-1 流れの抵抗に関する実験

Run No.	θ	q_m	q_w	q_s	c	h	h/h_0	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	0.113
A-3-2	7.0	124.2	118.4	5.8	0.047	0.99	0.995	
A-3-3	7.0	124.4	105.3	14.4	0.116	0.96	0.965	
A-3-4	7.0	124.3	105.1	16.0	0.129	1.00	1.000	
A-3-5	7.0	122.8	100.6	21.2	0.172	0.99	0.995	
A-3-6	7.0	121.5	92.0	28.3	0.233	1.08	1.085	
A-3-7	7.0	125.9	85.5	36.8	0.292	1.28	1.286	
A-4-1	7.0	128.1	128.1	0.0	0.000	1.02	0.995	0.114
A-4-2	7.0	128.5	121.6	5.7	0.044	1.04	1.020	
A-4-3	7.0	128.4	114.9	12.8	0.099	1.05	1.029	
A-4-4	7.0	126.6	106.6	19.2	0.152	1.04	1.015	
A-4-5	7.0	128.2	105.3	26.2	0.204	1.03	1.010	
A-4-6	7.0	127.6	96.8	33.2	0.260	1.14	1.113	
A-4-7	7.0	126.0	89.6	35.0	0.278	1.27	1.240	

表-2 粒子拡散に関する実験

Run No.	θ	q_m	q_w	q_s	c	h	k_s
	deg.	cm ² /s	cm ² /s	cm ² /s		cm	cm
B-1	7.0	131.7	119.8	11.9	0.091	1.05	0.115
B-2	7.0	129.9	108.9	21.0	0.162	1.03	
B-3	7.0	126.9	103.4	23.5	0.185	1.03	
B-4	7.0	127.7	100.7	27.1	0.212	1.12	
B-5	7.0	132.8	101.9	31.0	0.233	1.10	
B-6	7.0	132.4	99.2	33.2	0.251	1.14	

表-3 粒子濃度の鉛直分布に関する実験

Run No.	θ	q_m	q_w	q_s	c	c_0	h
	deg.	cm ² /s	cm ² /s	cm ² /s			cm
C-1	3.0	129.3	129.1	0.2	0.002	0.031	1.23
C-2	7.0	128.1	126.1	2.0	0.016	0.044	1.04
C-3	3.0	127.2	125.1	2.1	0.016	0.095	1.23
C-4	7.0	129.4	121.9	7.5	0.058	0.114	0.98
C-5	7.0	128.2	116.7	11.5	0.090	0.211	1.03
C-6	7.0	128.2	107.5	20.7	0.162	0.233	1.01
C-7	7.0	129.4	106.8	22.5	0.174	0.279	1.03
C-8	7.0	129.2	103.6	25.7	0.199	0.318	1.02
C-9	7.0	127.5	99.7	27.7	0.218	0.298	1.04

撮影する方法で行った。実験条件を表-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 $130 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、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の動きを追跡して、それらの結果に基づいて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。実験条件を表-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%であって、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_0 は、河床から1mmの高さにおいて測定された粒子濃度である。

平衡河床勾配に関する実験は、水路下流端に堰を設置して微細砂の堆積層を作り、与えられた水と微細砂の供給条件に対して堆積面が変化しなくなった時のその勾配を測定するような方法で行った。実験条件を表-4に示す。ここに、 θ_e は平衡勾配である。

3. 流れの抵抗および濃度の鉛直分布

図-2は、新井・高橋³⁾およびWinterwerp, et al⁴⁾のカルマン定数に関する実験値である。これらによれば、データーのばらつきは大きいものの、粒子濃度が20%をこえるとカルマン定数は明らかに増加している。図-3は、表-1の実験についてカルマン定数の代わりに水深と粒子濃度の関係を見たものである。粒子濃度が10数パーセントまでは水深の顕著な変化はみられないが、濃度がさらに増加すると水深は急増している。図中の実線はカルマン定数に関する志村¹⁾

表-4 平衡河床勾配に関する実験

Run No.	θ deg.	θ_e deg.	q_m cm^2/s	q_w cm^2/s	q_e cm^2/s	c
D-1	8.7	8.16	59.3	44.3	15.0	0.253
D-2	8.4	8.15	51.3	38.1	13.2	0.257
D-3	9.8	8.90	54.4	40.2	14.3	0.262
D-4	8.7	8.36	55.3	40.0	15.2	0.275
D-5	10.5	9.50	59.2	42.1	17.1	0.290
D-6	9.5	9.02	67.0	47.2	19.8	0.296
D-7	10.5	10.44	58.7	40.6	18.1	0.308
D-8	12.0	11.51	57.2	37.5	19.7	0.345

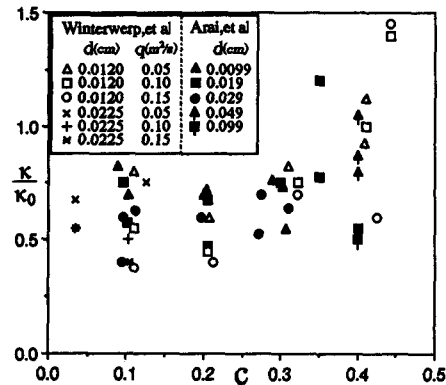


図-2 カルマン定数(文献3、4)による

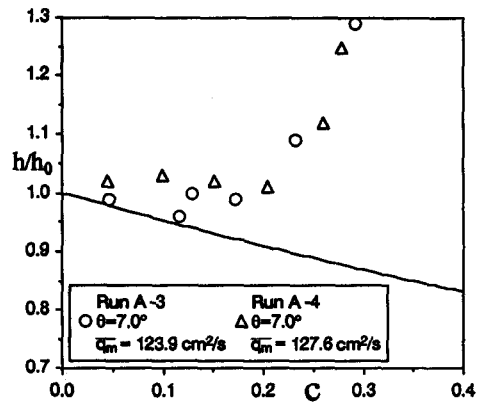


図-3 濃度による水深の変化

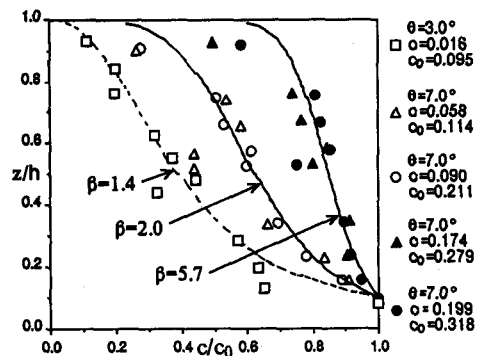


図-4 濃度の鉛直分布

の式と対数型流速分布則から求められる水深である。対数則を基準にしたとき、以上の結果は一般の浮遊砂流の領域よりも濃度が増加すると、乱れの混合距離あるいは渦のスケールが見かけ上増加することを示している。

図-4は、濃度の鉛直分布に関してRouse分布式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、表-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、係数 β を実験値に適合するように定めて算定されている。ここに、 β =粒子拡散係数/渦動粘性係数である。図示の結果によれば、粒子濃度が小さい領域ではRouse分布に従い、粒子濃度が大きくなるとそれからはずれて濃度が一様化しているのがわかる。これは、粒子濃度が大きい条件下において、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。

4. 流れの構造に関する考察

4.1 粒子拡散係数からみた流れの構造

粒子濃度の増加に伴って流れの抵抗が増加し、濃度の鉛直分布も一様化するといった現象は、形式的には乱れの混合距離が増加するものと考えれば説明のできる問題である。しかし、粒子濃度が増加すると、レイノルズ応力の生成ばかりでなく粒子同士の摩擦や非弾性衝突によって平均流のエネルギー散逸が起こることなどを考慮すると、上述のような解釈は不自然である。

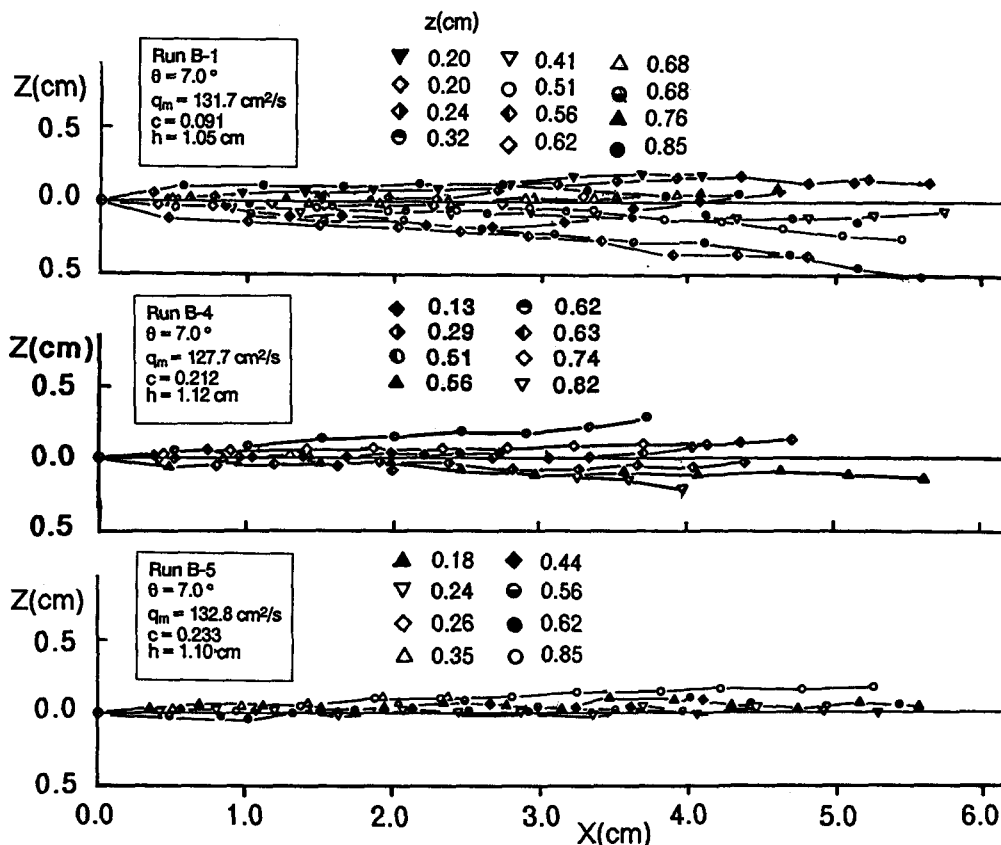


図-5 トレーサー粒子の軌跡

図-5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、粒子は層流的な運動に近づくことが分かる。ところで、乱れの凍結性を仮定し、図-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。

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

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。

図-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、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。

図-6の結果は、粒子濃度が増加すると、レイノルズ応力以外の応力が卓越してくることを示唆している。この応力は、流れの抵抗を増加させ、かつ濃度分布を一様化させる。

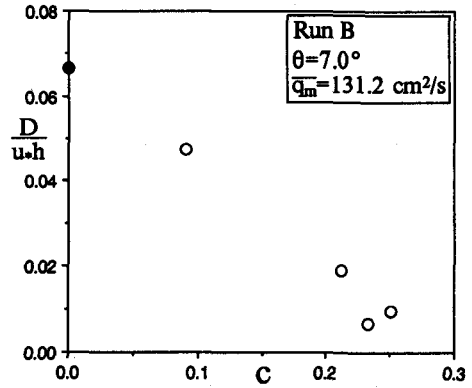


図-6 トレーサー粒子の拡散係数

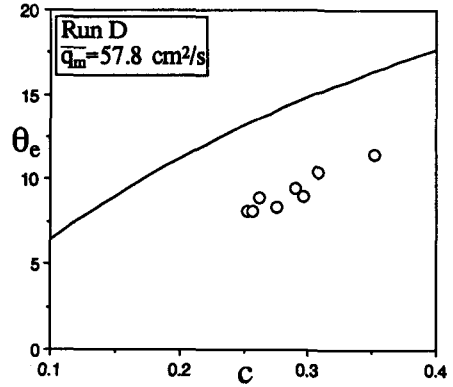


図-7 平衡河床勾配

4.2 平衡河床勾配からみた応力構造

簡単のため、等流状態のせん断力の構造について考えよう。土石流の応力構造の類推から、ここで対象としている流れのせん断力の主要なものとして、レイノルズ応力 τ_r 、粒子間摩擦力 τ_s および衝突にともなう応力 τ_d などが考えられる。これらを運動量保存則に代入し、 $z=0$ から h まで積分し、水面 $z=h$ におけるせん断応力を0とすれば次式を得る。

$$\rho_m g h \sin \theta - \tau_r(0) - \tau_s(0) - \tau_d(0) = 0 \quad (2)$$

ここに、 $\rho_m = (\sigma - \rho_w)c + \rho_w$ (σ : 砂粒子の密度、 ρ_w : 水の密度)、 h : 水深、 θ : 河床面 $z=0$ の勾配である。 $z=0$ においては合理性をもって $\tau_r(0)=0$ 、 $\tau_d(0)=0$ と置ける。ここで、 $\tau_s(0) = (\sigma - \rho)c'gh \cos \theta \tan \phi_s$ と置いて、式(2)に代入すれば、侵食も堆積も起こらない平衡河床勾配 θ_e が次式のように求められる。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma - \rho)c'}{(\sigma - \rho_w)c + \rho_w} \tan \phi_s \quad (3)$$

ここに、 c' は粒子間の骨格によって支えられている粒子の濃度、 ρ は乱れによる浮遊成分を考慮した流体層の密度で、 $\rho = (\sigma - \rho_w)c'' + \rho_w$ ($c' + c'' = c$)である。図-7は、平衡勾配 θ_e に関する実験値および式(3)において $c' = c$ としたときの計算値を示したものである。計算に用いた条件 $c' = c$ は、乱れによる浮遊成分を0としたことに相当しており、当然のごとく θ_e が実験値よりも大きく算定されている。

c' および c'' がどんな機構で配分されるかは今後の重要な検討課題であるが、図-7の結果はクーロン力的な応力(降伏応力)がかなり支配的になっていることを示唆している。

5. 結語

中央粒径0.16mm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、平衡河床勾配等を測定し、これらの結果に基づいて流れ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の問題点を要約する。

- (1) 粒子体積濃度が0~10%の範囲においては、流水抵抗はあまり変化しないが、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、これよりもかなり一様化する。
- (3) (1)および(2)の結果は、対数則を前提とすれば、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が、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に関与する応力の一つとして、クーロン型の降伏応力の存在が考えられる。平衡河床勾配に関する実験によってこのことがほぼ確認された。

今後、レイノルズ応力、降伏応力、粒子間応力などの決定機構に関する詳細な検討が必要である。

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。また、本研究を進めるに当たり、京都大学 4 回生 千代啓三君に種々御協力いただいていることを記し、ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 志村博康: 浮遊砂の流れの基礎的研究, 山形大学紀要(農学), 4巻, 4号, 1964, pp405-459.
- 2) 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, No.92, 1963, pp11-20.
- 3) 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., pp69-77.
- 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., pp36-54.