

浮遊砂に関する研究(3)

——微細粒子の影響について——

道 上 正 規

STUDY ON THE SUSPENDED SEDIMENT (3)

——On the Effect of Fine Sediment on the
Suspended Load ——

By Masanori MICHIEU

Synopsis

It is very important to understand the effect of wash load on sediment transportation and flow properties. In order to clarify the effect, the experiment for fall velocity in the still fluid in suspension of fine sediment and the experiment for concentration distribution of coarse sand in the flow with fine sediment were carried out. It was clarified from these experiments that in the fluid in suspending fine sediment, relative viscosities increase and relative fall velocities decrease, with increasing the concentration of fine sediment. The concentration gradient of coarse sand in the flow with fine sediment decrease under the constant condition of shear velocity with the increase of the concentration of fine sediment.

This paper showed that this phenomenon can be explained if we consider the changes of the viscosities with the increase of the concentration of fine sediment. Moreover, the increase of the wash load plays a role to increase the rate of suspended load.

1. 緒 言

洪水時における河川の浮遊形式の流砂量を測定したとき、この流砂量の中で、河床砂に存在しないような微細粒子、いわゆる wash load と呼ばれるものの占める割合は非常に大きい。たとえば、Egiazaroff¹⁾ によって報告された例では、wash load の濃度が 200~500 gr/l に達しており、wash load の推定法やそれが流れおよび流砂に及ぼす効果の検討が重要になってくるものと考えられる。このような wash load の量は、流域の地質や裸地面積率および流出形態によって支配されると考えられるので、これを推定することは現在非常に困難であって、山腹斜面の水理量と粒度特性からそれを推定しようとする研究が行なわれているにすぎない^{2), 3)}。一方、もしこうした wash load の量が与えられた場合、これが河床材料からなる浮遊砂や流れに対してどのような影響を与えるかを検討することも重要な課題といえよう。

乱流場における粒子を含む流れの研究は、Vanoni⁴⁾ の実験から始まり、その後多くの研究者によって行なわれ、開水路における土砂流においては、次のような事実が明らかにされている。

- i) 浮遊砂濃度の増加に伴って、流速分布におけるカルマン定数の減少および抵抗係数の減少が生じる。
- ii) 流速分布の対数則からのずれがとくにめだつのは、濃度の高い壁面付近である。

このような実験事実に対する定性的説明として、Vanoni や Brooks⁵⁾ は土砂を浮遊状態に保つためには、乱れによって浮遊土砂に仕事が必要があるので、その分だけ平均流から乱れにエネルギーが余分に供給されるため、平均流の速度こう配が増加しなければならないと考えた。わが国においては、この現象を

理論的に説明しようとして、浮遊砂を含む流れのエネルギー方程式に基づいた考察が、志村⁶⁾、日野⁷⁾によって試みられてきた。すなわち、志村は乱れのエネルギー方程式において、粘性によるエネルギー逸散項を表示するために、乱れ特性量として、乱れの強さが一定で、渦のスケールのみが縮少すると仮定して、次式のようなカルマン定数の変化を表わす式を導びいた。

$$\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\kappa_0} = \frac{4.8C(\sigma - \rho)gw_0(h - \delta)}{\rho u_*'^3 (\ln h / \delta - 1)} \quad (1)$$

ここに、 κ : 浮遊砂流のカルマン定数、 κ_0 : 清水のカルマン定数、 C : 浮遊砂濃度、 g : 重力加速度、 σ, ρ : それぞれ砂および水の密度、 u_*' : 摩擦速度、 w_0 : 清水中での砂の沈降速度、 h : 水深、 δ : 粘性底層厚である。また ii) の項目に関しても、志村は粒子の衝突の効果を導入して説明を試みている。

以上の実験結果は、砂粒径が 0.1 mm 以上の実験から得られたものであって、微細砂に対してどのようなかはあまりよく知られていない。したがって、このような点を明らかにするために、吉川・福岡⁹⁾は wash load に関する実験を行ない、wash load の増加に伴って、流速分布におけるカルマン定数が減少し、浮遊砂量 (bed material load) が増加するという実験結果を提示した。この実験は移動床を対象に行なわれたものであり、その測定の実験的困難性および現象の複雑さのため、十分な理論的説明はなされていない。したがって、ここでは単純化した条件下において、河川の wash load になるような微細粒子を含む流れの特性および浮遊砂の濃度分布特性を測定することによって、wash load の水理学的役割を検討する。¹⁰⁾

2. 実験装置と実験方法

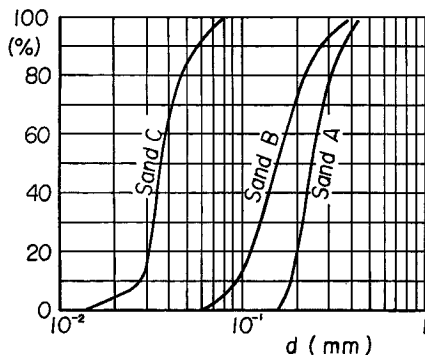


Fig. 1 Size distribution of used sand.

実験水路は水路幅 20 cm、長さ 20 m の循環式水路で、種々の測定はすべて水路中央部で行なった。浮遊砂および wash load の濃度計測は採水口が 2 mm × 30 mm の長方形断面のサイフォン式採水器を用いて行なわれ、一方流速分布は外径 3 mm で内径 2 mm のピトー管を用い、これを差圧計につないで計測した。使用砂の粒度特性および粒度分布はそれぞれ Table 1 と Fig. 1 に示すとおりで、Sand C が微細粒子となる材料である。高濃度の微細粒子を含む流体では、見かけの粘性係数が清水のそれとは異なることが知られているので、このような流体の見かけ粘性係数を毛細管粘度計を用いて計測した。

河床形態が flat bed で、摩擦速度をほぼ一定に保って、微細粒子の Sand C の濃度を次第に増加させた場合の浮遊

Table 1 Characteristics of used sand

	σ (gr/cm ³)	d_{50} (mm)	$\sqrt{d_{84}/d_{16}}$	w_0 (cm/s · 8°C)
Sand A	2.71	0.24	1.28	2.43
Sand B	2.60	0.15	1.48	1.34
Sand C	2.38	0.036	1.28	0.0687

砂 (bed material load) の濃度分布および流速分布を計測した。ついで、滑面水路で、摩擦速度を一定に保って、微細粒子を含む流体を作り、これに Sand B が水路床に堆積しない限界状態まで給砂した状態の濃度分布などを計測するとともに、微細粒子のみを含む流れの流速分布を計測したが、これらの実験条件が Table 2 に示されている。

Table 2 Summary of experimental conditions and results

Run No.	I	h (cm)	U (cm/s)	C_w^* (ppm)	C_s^{**} (ppm)	κ	T °C	Sand	Bed Form
13	0.00256	6.95	55.0	2,100	9,500	0.33	20.0	B	Flat
14	"	6.88	56.0	7,300	6,100	0.27	18.0	B, C	
15	"	6.75	59.0	13,000	7,100	0.33	23.0	" "	
16	"	6.77	63.0	55,000	5,200	0.27	18.0	" "	
17	0.00652	3.58	83.7	1,500	22,000	0.28	22.0	B	Smooth Rigid
18	"	"	84.4	8,600	20,000	0.28	23.0	B, C	
19	"	"	84.1	17,000	"	0.24	17.0	" "	
20	"	"	81.7	56,000	26,000	0.28	19.0	" "	
21	"	"	84.6	200,000	37,000	0.26	19.0	" "	
22	0.00652	3.58	77.7	0	0	0.40			"
23	0.00652	3.58	76.4	11,000	0	0.40	20.5	C	"
24	"	"	77.6	64,000	0	0.38	22.0	"	
25	"	"	84.6	230,000	0	0.37	23.0	"	
26	"	"	84.3	435,000	0	0.38	28.0	"	

*: Concentration of wash load

**: Concentration of suspended sediment

3. 微細粒子を含む流体中の砂粒子の沈降速度

粒子を含む流れの見かけ粘性係数の増大に関して、Einstein は理論を展開し、次式のような単純な関係を誘導したことは周知のとおりである。

$$\mu_c/\mu_0 = 1 + 2.5C \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 μ_c , μ_0 : それぞれ容積濃度 C の見かけ粘性係数および清水の粘性係数である。その後、これに関する多くの実験が行なわれ、(2)式の濃度に関する高次の項を付加した修正式が種々提案されている。しかしながら、粘土やシルトのような微細な土粒子を含む流体では、粒子間に働く電気化学的な作用によってフロックが形成され、大同¹¹⁾によって指摘されたように、Einstein の理論あるいはそれを修正した式ではとうてい説明できない程、粘性が増加する。森・乙竹¹²⁾の考え方を発展させて、大同は粘土やシルトを含む流体の粘性係数を次式のように表わした。

$$\frac{\mu_c}{\mu_0} = 1 + \frac{3}{(1/\beta_s C_w - 1/0.52)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 β_s : 比例定数、 C_w : 微細粒子の容積濃度である。いま、従来の研究を参考にして、 $\beta_s = 2$ と仮定すれば、(3)式から濃度の変化による粘性係数の性状が知れる。

Fig. 2 は(3)式と2種類の材料に対する比粘性係数を比較したものである。 $\beta_s = 2$ の値は Sand C に対する粘度特性を非常によく表わしているが、大戸川流域（流域の地質は花崗岩の風化土からなる）の山腹から採取した 53μ 以下のシルトに対しては若干小さいようである。このことは、土壌の化学的成分の割合によって β_s の値が変化することを示しており、与えられた材料に対して β_s が決定できるような方法の樹立が必要であらう。しかし両者の濃度の増

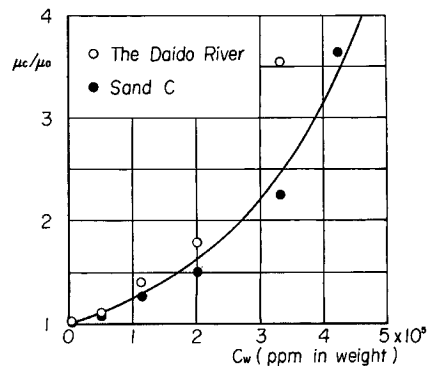


Fig. 2 Relationship between relative viscosity and concentration of fine sediment.

加による比粘度の増加傾向は、ほぼ(3)式で示されるように思われる。ここでは、 $\beta_s=2$ として、(3)式に基づいて計算された見かけ粘性係数を用いて、各種の沈降速度の計算式で計算した結果と、Sand Cの濃度を变化させて沈降速度を計測した実験値の比較が Fig. 3 に示されている。図中の Allen の式と Stokes の式の中間の曲線は、実験値のレイノルズ数が両者の式の適用範囲の中間的な場合に相当しているものを表わしている。これから明らかなように、粒径が小さくなるにしたがって、微細粒子の濃度の影響のために、比沈降速度は小さくなり、実験値のばらつきを平均化してみると、(3)式による見かけ粘性係数を用いれば、上述の式ではほぼ補正された沈降速度を求めることができる。

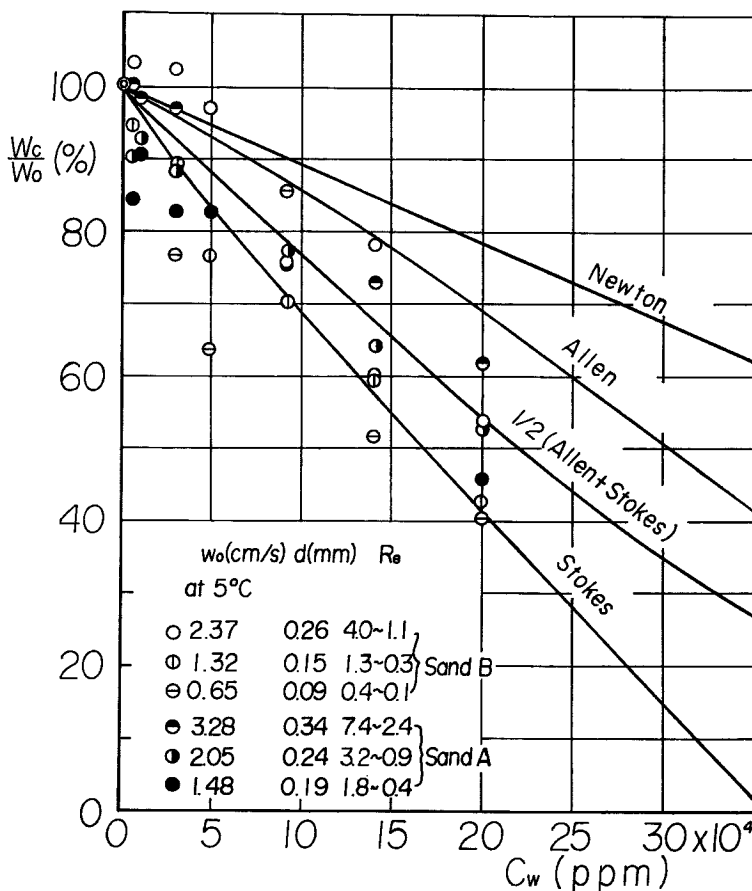


Fig. 3 Relationship between relative fall velocity and concentration of fine sediment.

以上述べたように、微細粒子の濃度の増加は見かけ粘性係数および流体の密度の増大を引き起こし、この影響によって他の粒径の粒子の沈降速度を減少させることが明らかにされた。このような実験結果は Nordin⁽¹³⁾ によっても報告されている。

4. 微細粒子を含む流体中の浮遊砂の濃度分布特性

平衡状態の浮遊砂の濃度分布式としては、一様砂および混合砂に関して次の Rouse の式が適用できることが実験的に明らかにされている。⁽¹⁴⁾

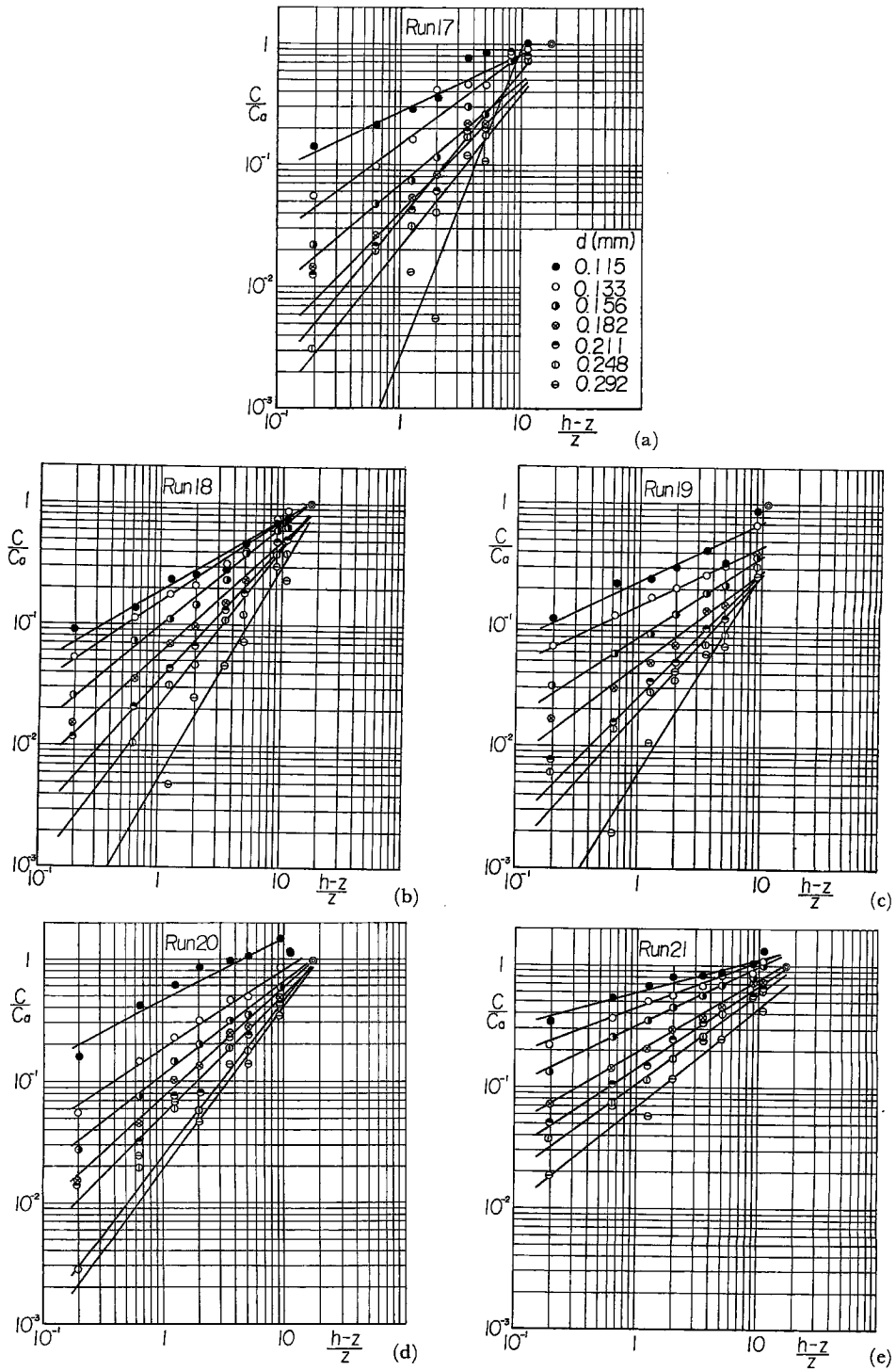


Fig. 4 Concentration distribution of suspended load in fluid with fine sediment.

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^Z, \quad Z = \frac{w_0}{\beta \kappa u_*} \dots \dots \dots (4)$$

ここに, C_a : $z=a$ の点の濃度である。

滑面水路で, u_* をほぼ一定に保って, 微細粒子の Sand C を含む流体を作り, これに Sand B を水路床に堆積しない限界状態まで給砂した状態の濃度分布の測定結果が Fig. 4 に示されている。また, このような実験の水理量や Sand C の断面平均濃度については, Table 2 に要約されている。Fig. 4 において, Run 18 では Sand C の濃度は 8,600 ppm, Run 21 では 200,000 ppm であって, Sand C の増加によっても, Sand B の各粒径ごとの濃度分布は (4) 式で表わされること, および Sand C の増加によって濃度こう配が一樣になることが理解されよう。微細粒子を含む流れでは, u_* を一定にした場合, 微細粒子によってカルマ

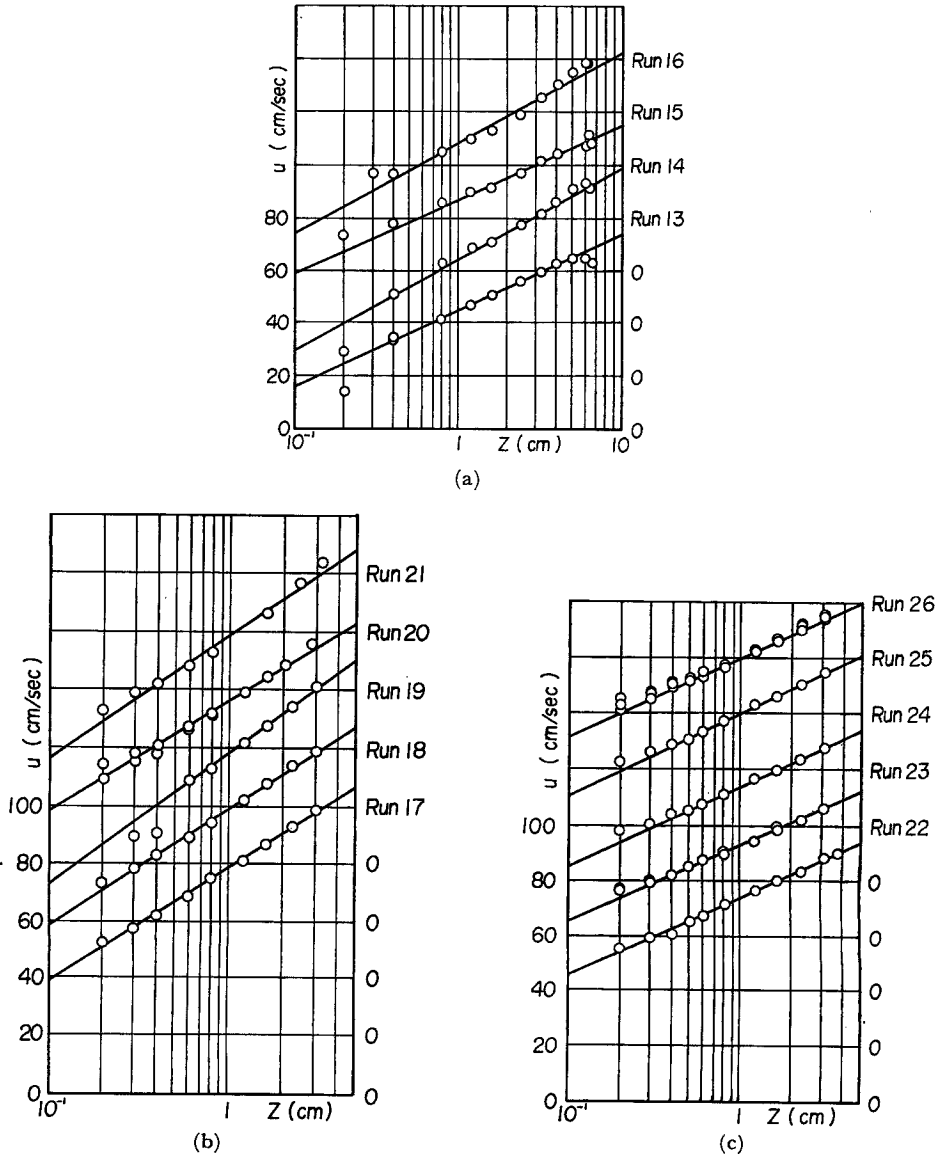


Fig. 5 Velocity distribution.

ン定数が減少し、したがって濃度こう配が大きくなるであろうと予想したが、これに反して Fig. 4 の結果はその逆の傾向を示している。一方、Sand B の河床付近の濃度 C_a は Sand C の増加に対してほとんど変化を示さなかったの、断面平均濃度の増加は濃度こう配の減少に依存しているといえよう (Table 2 の C_a 欄参照)。ここに示した実験例は固定床水路におけるものである、Sand B を水路床に敷いた移動床流れにおいても、これと同様の実験を行なったが、河床波の影響のために、濃度分布の測定に誤差が含まれ、その分布形を詳細に議論することはできなかった。

つぎに、Fig. 5 は各実験の流速分布形を示したものであるが、流速分布はまほ対数則で表わされ、とくに微細粒子のみを含む流れの場合には、濃度が非常に高いにもかかわらず、対数則の成立していることがうかがえる。したがって、Fig. 5 から求めたカルマン定数を(4)式の指数部の Z に適用した結果と、濃度分布から得られた Z_1 とを比較したものが Fig. 6 である。Fig. 6 (a) は従来のように清水中の沈降速度を用いて Z を計算したものであり、一方 (b) は(3)式に基づいて微細粒子の濃度の増加による見かけ粘性係数

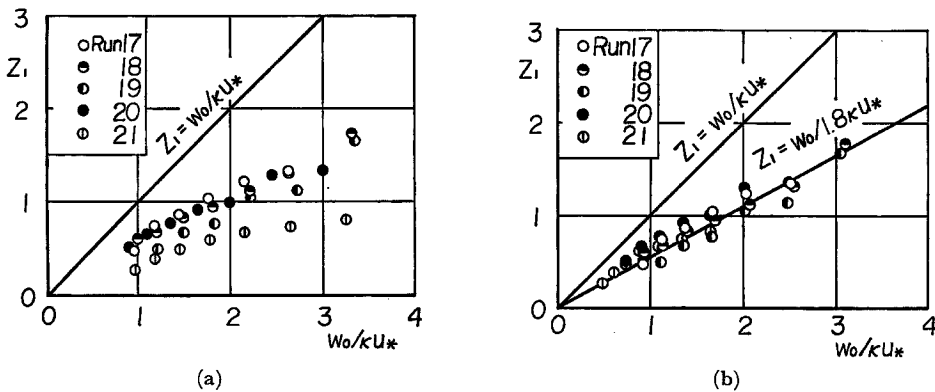


Fig. 6 Comparison between Z_1 and Z .

の変化を考慮して、補正された沈降速度を用いて Z を計算したものである。これから明らかなように、清水中の沈降速度を用いたのでは、実験値の散点が非常に大きい、微細粒子を含む流体の粘性の変化を考慮に入れて計算された沈降速度を用いれば、

$$Z = 1.8Z_1 \quad (5)$$

となって、実験値の散点もかなり小さくなることがわかる。したがって、微細粒子によって形成されたフロックは通常の流れの乱れによっては破壊されず、流体の粘性の変化に大きく寄与するものと考えられる。

一方、河床面付近の濃度 C_a が微細粒子の濃度の増加にともなって変化しない理由は次のように考えられよう。微細粒子の存在によって、浮遊砂の沈降速度は減少し、浮きやすくなるものと考えられるが、一方、これとは反対に、河床面付近の濃度を決定する河床面から粒径の高さにおける乱れの強さが、何らかの影響を受けるはずである。Fig. 7 は開水路における流れ方向の乱れ強さの鉛直分布に関する従来の実験資料を示したものであるが¹⁵⁾、ここで用いた Sand B の砂粒レイノルズ数は 11.6 以下であって、この図の粘性底層の領域に属している。したがって、微細粒子の濃度増加にともなって、動粘性係数が増大するので、河床面から粒径の高さの乱れ強さの減少が期待される。これらの 2 つの理由から、Run 17~21 の実験における河床面付近の濃度が微細粒子によって変化しなかったものと考えられるが、 $u_*d/\nu \gg 11.6$ の浮遊砂に関しては、微細粒子の濃度の増加にともなって、河床面付近の濃度は増加することが期待されよう。

以上の考察から、微細粒子を含む流れにおいては、微細粒子の存在が粘性を変化させ、これが浮遊砂の沈降速度に大きな影響を及ぼすことが明らかにされた。それゆえ、高濃度の wash load を含む流れにおいて

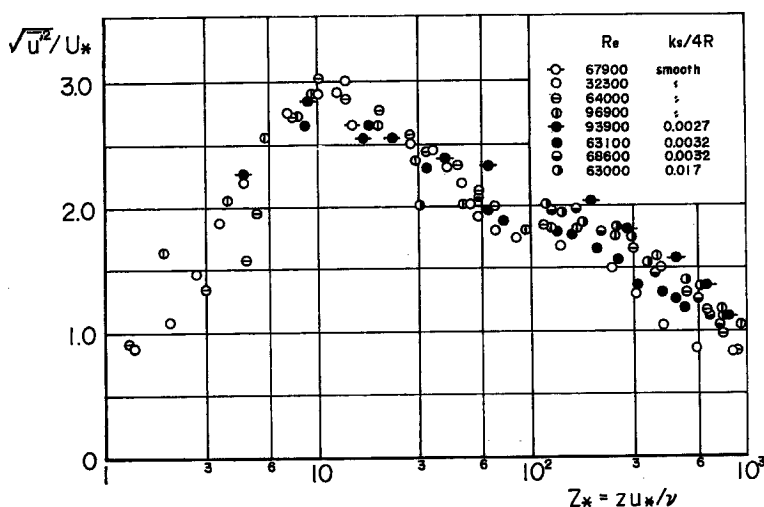


Fig. 7 Variation of turbulent intensities with relative distance for smooth and rough boundaries (after Blinco and Partheniades).

は、浮遊砂の濃度分布を決定する $Z = w_0/\beta\kappa u_*$ の沈降速度として、清水中の沈降速度を用いるのではなく、wash load による粘性の変化を考慮した沈降速度を用いなければならない。

5. 微細粒子を含む流れのカルマン定数の変化

Fig. 5 に示したように、流速分布は対数則で表わされるので、(1) 式と実験値から求めたカルマン定数を比較することができると考えられる。(1) 式で κ を計算するに際しても、やはり粒子の沈降速度をいかに決定するかが問題となるが、清水中の沈降速度を用いた場合と微細粒子の濃度による粘性の変化を考慮した沈降速度を用いた場合の比較が Fig. 8 に示されている。この場合にも、この図から明らかなように、微細粒子の濃度による粘性の変化を考慮した沈降速度を用いれば、(1) 式で浮遊砂を含む流れのカルマン定数の推定が可能となる。さらに、微細粒子のみを含む流れ (Run 23~26) においては、濃度が非常に大きく変化しているにもかかわらず、Table 2 に示したカルマン定数はほとんど変化しておらず、この現象からも微

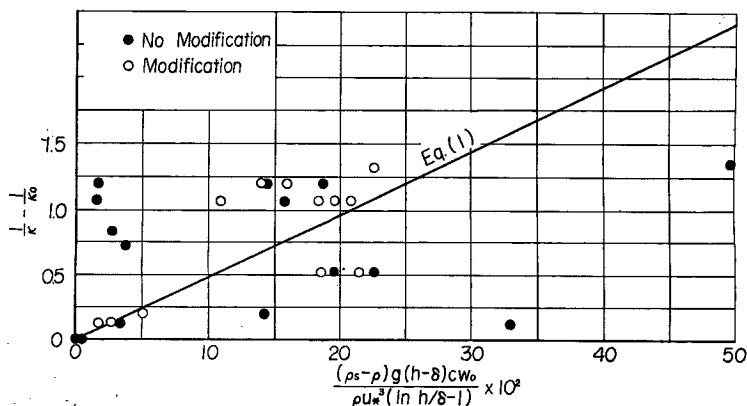


Fig. 8 Variation of a of flow with fine sediment.

細粒子の存在が流体の粘性の変化に大きく貢献していると言えよう。

6. 結 語

以上、河川の wash load の浮遊砂および流れに及ぼす影響を検討するために、wash load になりうる微細粒子を含む流れを形成し、このような流れの流速分布および浮遊砂の濃度分布の測定から、微細粒子濃度の増加は流体の粘性係数を増加させるのに寄与していることが明らかにされた。すなわち、微細粒子の濃度の増加に伴って、浮遊砂の濃度こう配は小さくなり一様分布に近づくが、これは微細粒子による粘性の変化を考慮した沈降速度を、従来の浮遊砂の濃度分布式に適用することによって説明される。また、微細粒子を含む流れの流速分布に関しても、浮遊砂によるカルマン定数の変化を表わす(1)式に、粘性の変化を考慮した沈降速度を用いれば、カルマン定数の変化が表現されることが明らかにされた。このように、土砂を含む流れにおいては、粒径の大きさによって、流体に及ぼす効果が異なり、wash load のような微細粒子では、流体の粘性の変化を引き起こすことが判明したが、今後さらにその細部機構に立入った研究が必要であると考えられる。

最後に、この研究の実験および資料整理に関しては、京都大学大学院生田中健二君の労に負うところが大きいことを記して深謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Egiagaroff, I. V.: Polyphase currents with non-uniform sediments and the physics of river flow, Proc. of 13th Congress of IAHR, Tokyo, Vol. 2, 1969, pp. 165-175.
- 2) 芦田和男・高橋 保・奥村武信・道上正規・沢田豊明：山地流域における出水と土砂流出，京大防災研究所年報，第15号B，昭47. 4, pp. 349-361.
- 3) 村本嘉雄・道上正規・下島栄一：大戸川における微細砂の流送過程について，京大防災研究所年報，第16号B，(投稿中)。
- 4) Vanoni, V. A.: Transportation of suspended sediment by water, Trans., ASCE, Vol. 111, 1946, pp. 67-133.
- 5) Vanoni, V. A. and N. H. Brooks: Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams, Rept. No. E-68, Sedimentation Laboratory, Calif. Inst. of Technology, 1957.
- 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，第46号，昭32, pp. 22-29.
- 7) 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，第92号，昭38, pp. 11-20.
- 8) 志村博康：浮遊砂のある流れの基礎的研究，山形大学紀要，第4巻，第4号，昭39, pp. 41-97.
- 9) Kikkawa, H. and S. Fukuoka: Hydraulic roles of wash load, Trans, JSCE, No. 155, 1968, pp. 42-51.
- 10) 道上正規・田中健二：微細粒子が浮遊砂に及ぼす影響について，土木学会第26回年次学術講演集，第2部，昭46, pp. 169-172.
- 11) 大同淳之：粘土を多量に含む流体の粘度と降伏値，第15回水理講演会講演集，昭46, pp. 1-6.
- 12) 森 芳郎・乙竹 直：懸濁液の粘度について，化学工学，第20巻，9号，1956.
- 13) Nordin, C. F.: A preliminary study of sediment transport parameters, Rio Puerco near Bernad, New Mexico, Prof. Paper 462-c, U. S. Geol. Survey, 1963.
- 14) 芦田和男・道上正規：浮遊砂量に関する実験的研究，京大防災研究所年報，第10号B，昭42, pp. 63-79.
- 15) Blinco, P. H. and E. Partheniades: Turbulence characteristics in free surface flows over smooth and rough boundaries, Joul. of Hydraulic Research, Vol. 9, No. 1, 1971, pp. 43-71.