

固液混相開水路流れの水力特性に関する研究 (1)

今本博健・大年邦雄

STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF OPEN CHANNEL FLOW WITH SUSPENDED LOAD (1)

By *Hirotake* IMAMOTO and *Kunio* OHTOSHI

Synopsis

This paper deals with characteristics of the resistance coefficient and the vertical distributions of velocity and concentration of free surface shear flows with suspended sand particles, as a first stage of research program for hydraulics of multi-phase flows.

Main results obtained through the experimental investigation are as follows; 1) The resistance coefficient of a sediment-laden flow over smooth bed increases with, while that of a flow over rough bed decreases, with increasing of sediment concentration. 2) The vertical distribution of mean velocity in the outer region is confirmed to be logarithmic for a sediment-laden flow as same as a clear water flow. 3) It should be noticed that, in a sediment-laden flow over smooth bed, decreasing of velocity near the bed results larger velocity gradient compared to a clear water flow, and that, in a sediment-laden flow over rough bed, increasing of velocity near the free surface results larger velocity gradient. 4) The Karman constant of sediment-laden flow over both smooth and rough beds becomes larger than that of a clear water flow. The integral constant of a logarithmic velocity distribution for a flow over smooth bed decreases with increasing of sediment concentration, but that for a flow over rough bed increases with increasing of sediment concentration. 5) The characteristics of turbulence of a sediment-laden flow is also changed from that of a clear water flow, especially in the region near the bed, where the turbulence intensity and the energy dissipation rate become larger. 6) Non-uniform lateral distribution of sediment concentration may be described by the connection with large-scale turbulent motion such as a secondary flow. That is, high and/or low speed streaks are seemed to correspond with low and/or high sediment concentration, and these characteristics should be more investigated in details.

1. 序

清水流および混相流を問わず、その水力特性を実験的に検討するためには、高精度の計測技術および装置が必須である。さらに、混相流の水力特性を把握するためには、清水流の内部構造に関する知見を基礎としなければならないことが多い。

このような事情が背景にあるためか、混相流の水力特性に関する研究の歴史は比較的浅く、日野¹⁾によって統一的理解がなされているとはいうものの、詳細については不明の点が数多く残されている。

近年、計測技術の向上に伴い、混相流に関する研究が活発に行なわれるようになり^{2)~4)}、その水力特性は次第に明らかにされつつあるが、本研究は、固液混相開水路流れの水力特性の解明に寄与することを目的とし、まず、土砂を浮遊した滑面および粗面上の開水路流れを取上げ、その抵抗特性、乱れ特性および濃度分布特性に関して、詳細な実験的検討を加えたものである。

本研究の結果、滑面上の浮遊砂流においては抵抗係数が濃度とともに増加する、乱れの強さおよびエネルギー逸散率は壁面近傍でかなり大きくなるなど、興味深い知見が数多く得られている。また、従来あまり注

目されなかった2次流と浮遊砂濃度分布との関係についても検討を加えている。

2. 実験装置および方法

実験として、長さ 13 m、幅 40 cm、深さ 20 cm の循環式滑面直線水路を使用した。一般に、浮遊砂流の実験に循環水路を使用する場合、濃度あるいは水温の制御が困難であるため、本実験では、水路上流端で連続的に給砂を行なうとともに、低水槽内に設けられた網によって砂を回収し、清水のみが高水槽へ循環されるようになっている。これら実験水路の概要を Fig. 2-1 に示す。

また、一様砂を張付けた鉄板を路床全体にわたって敷きつめることにより、粗面上の流れについての実験も行なったが、この場合の砂粒径 d_s は 0.24 cm, 0.39 cm, 0.61 cm の3種類であり、底面の砂粒頂より $1/4 d_s$ 下方を仮想路床面としている。

水深計測には 1/10 mm 読みのポイントゲージを用い、流量計測には流量ますを使用した。また、速度計測にはコニカル型ホットフィルム流速計を用いたが、浮遊砂流への適用性については種々の観点より検討した結果、十分であることが確認されている⁵⁾。また、プローブの設定位置の読取りには 1/100 mm 読みのダイヤルゲージを併用し、設定誤差を極力押えるよう配慮されている。

浮遊砂濃度は、 2×20 mm の長方形断面を有する採水器にパイプをつなぎ、サイフォン方式によって採水することにより計測されている。この際、採水速度は計測点における局所的平均流速に一致するよう努めている⁶⁾。また、乾燥砂の重量計測には 10^{-4} gr まで計測可能な精密ばかりを使用している。

実験に用いた浮遊砂は珪砂7号(平均粒径 $d_m = 0.0159$ cm)であり、その粒径加積曲線は Fig. 2-2 に示されている。

また、実験の水理条件は Table 2-1 にまとめられている。

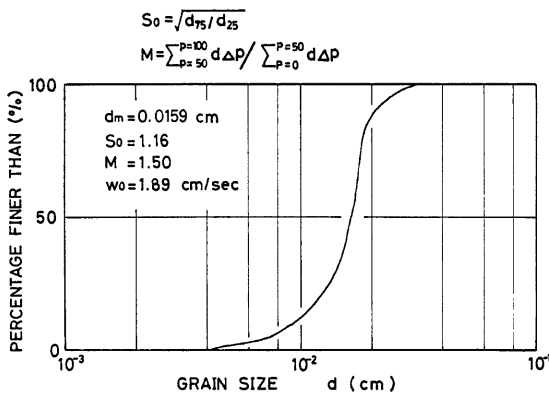


Fig. 2-2. Size frequency distribution of used sand.

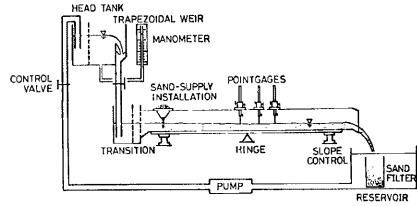


Fig. 2-1. Experimental channel.

Table 2-1 Conditions of experiments.

Run No.	Discharge Q (l/sec)	Depth H (cm)	Bed Slope I_b	Reynolds Number R_e	Froude Number F_r	Roughness Height d_s (cm)	Mean Concentration C_m (ppm)
S-1	6.506	2.35	1/168.2	1.52×10^4	1.45	smooth bed	0~4500
R-1	6.572	2.60	1/50	1.52×10^4	1.25	0.61	0~4600
D-1	9.086	3.92	1/100	2.04×10^4	0.93	0.61	0
D-2	9.086	3.88	1/100	2.04×10^4	0.93	0.61	3130
A	6.572	2.60	1/50	1.52×10^4	1.25	0.61	0~4600
B	6.506	2.35	1/168.2	1.52×10^4	1.45	smooth bed	0~4500

3. 抵抗特性に関する検討

3.1 抵抗係数

抵抗係数 C_f は、壁面せん断応力と流体の慣性力との比として定義され、2次元等流開水路流れにおいては、摩擦速度 $U_f = \sqrt{gHI_b}$ (g : 重力の加速度, H : 水深, I_b : 路床勾配), 断面平均流速 $U_m = Q/BH$ (Q : 流量, B : 水路幅) を用いて

$$C_f = 2(U_f/U_m)^2 \dots\dots\dots (3.1)$$

と表わされる。このように表示される抵抗係数が、浮遊砂の影響を受けてどのように変化するかを、実験的に検討する。なお、以下においては、浮遊砂流における抵抗係数 C_f は、同一流量の清水流における抵抗係数 C_{f_0} で基準化されている。

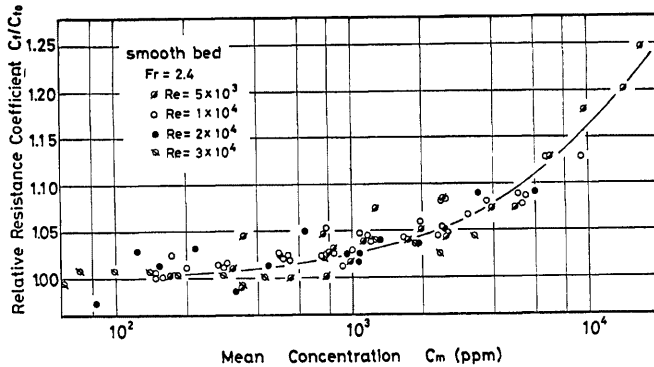
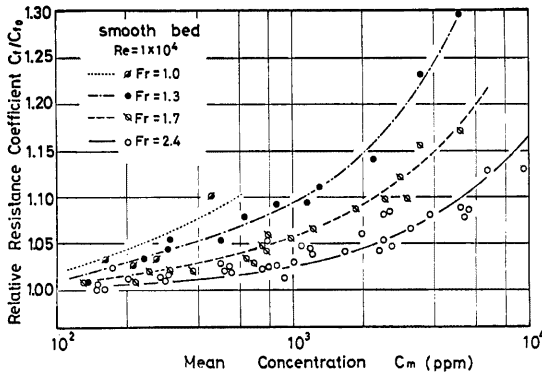
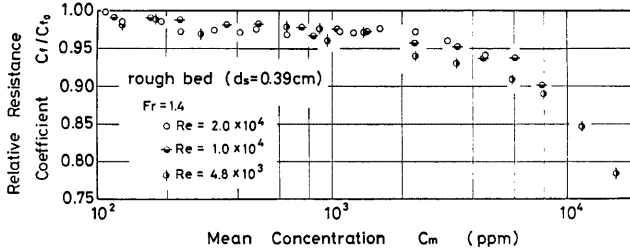


Fig. 3-1. Relation between C_f/C_{f_0} and C_m (smooth bed).

Fig. 3-1 は、滑面開水路浮遊砂流において、フルード数 $F_r = U_m/\sqrt{gH}$ をほぼ一定に保ち、レイノルズ数 $R_e = U_m H/\nu$ を種々変化させた場合の抵抗係数比 C_f/C_{f_0} と平均浮遊砂濃度 C_m との関係を示したものであって、 $C_m = 2,000$ ppm 程度の低濃度における C_f/C_{f_0} はほぼ1に等しく、清水流との差異はないが、さらに C_m が増加すると C_f/C_{f_0} も次第に増加し、 $C_m \approx 6,000$ ppm では $C_f/C_{f_0} \approx 1.1$ となっている。また、 C_f/C_{f_0} と C_m との関係は R_e によってほとんど変化していない。Fig. 3-2 は、 R_e を一定に保ち、 F_r を変化させた場合の C_f/C_{f_0} と C_m との関係を示したものであって、計測値にはかなりのばらつきが認められる

Fig. 3-2. Relation between C_f/C_{f_0} and C_m (smooth bed).Fig. 3-3. Relation between C_f/C_{f_0} and C_m (rough bed).

が、いずれの F_r においても C_m の増加に伴って C_f/C_{f_0} は増加し、 F_r の小さいものほど増加の度合は大きくなっている。

次に、粗面開水路浮遊砂流における C_f/C_{f_0} と C_m との関係について検討する。Fig. 3-3 は、路床粗度高 $d_s = 0.39$ cm とし、 F_r をほぼ一定に保ちつつ Re を変化した場合を示したものであって、滑面の場合とは逆に、 Re にほとんど関係なく C_m の増加に伴って C_f/C_{f_0} は減少している。また、Fig. 3-4 (a)~(c) は、3種類の粗面上 ($d_s = 0.24, 0.39, 0.61$ cm) で、 Re を一定に保ち、 F_r を変化した場合の C_f/C_{f_0} と C_m との関係を示したものであり、 C_f/C_{f_0} は C_m の増加とともに減少し、さらに、 F_r の小さいものほど減少の度合が大きいことが認められる。なお、3種の d_s のいずれの場合も水理学的に完全粗面の状態である ($U_f d_s / \nu = 115 \sim 333$)。

以上のように、開水路浮遊砂流の抵抗係数は、浮遊砂濃度によって変化し、滑面では増加、粗面では逆に減少することが確かめられるとともに、この変化はフルード数の小さな場合ほど顕著であり、レイノルズ数の影響はほとんど受けないことが明らかにされた。

また、 C_f/C_{f_0} と C_m との関係に d_s が及ぼす影響を検討するために、Fig. 3-4 (a)~(c) における $F_r = 1.3$ の場合を取り出してまとめたものが Fig. 3-5 であって、 d_s の小さい方が抵抗係数の減少の度合が大きくなることわかる。滑面における結果も加えて、 $C_m = 3,000$ ppm に対応する C_f/C_{f_0} の値を図示すると Fig. 3-6 のようになり、 Re 、 F_r および C_m が一定のもとでは、 d_s の変化に伴って C_f/C_{f_0} は図中の破線で示されたような変化をするものと考えられる。このような変化は、浮遊砂の存在によって路床粗度の影響が緩和さ

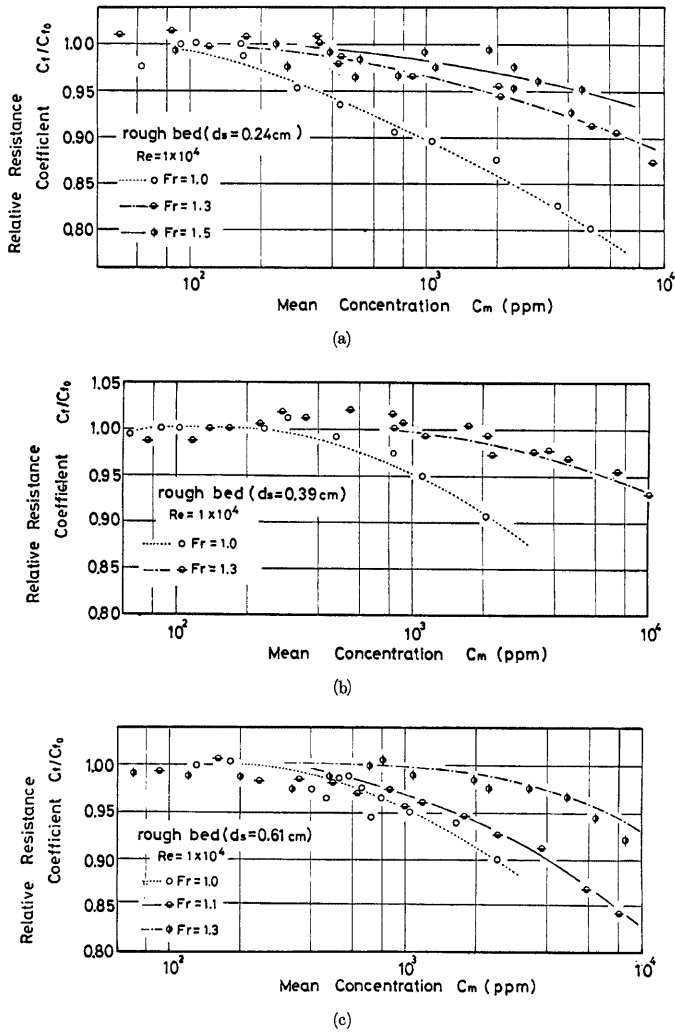


Fig. 3-4. Relation between C_f/C_{f_0} and C_m (rough bed).

れることによる C_f の減少作用と、浮遊砂の存在によって二次流が安定することによる C_f の増加作用とにより説明できるようにも考えられるが、この点に関しては、今後詳細に検討していく必要がある。

3.2 平均速度分布

滑面および粗面 ($d_s = 0.61 \text{ cm}$) 上の清水流と浮遊砂流において計測された平均速度分布の一例を、路床からの高さ y に対して示すと、それぞれ、Fig. 3-7 および Fig. 3-8 のようになる。滑面上の浮遊砂流は、

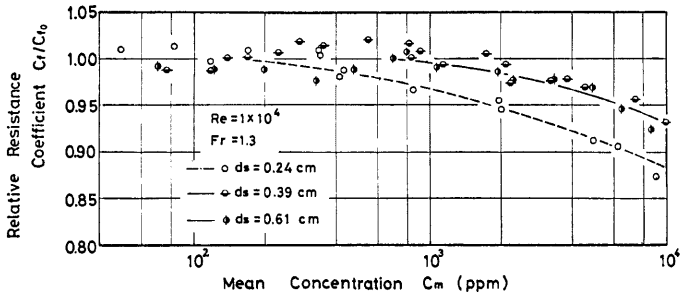


Fig. 3-5. Relation between C_f/C_0 and C_m (rough bed).

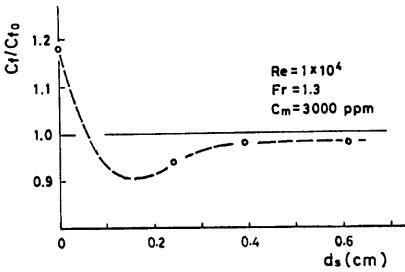


Fig. 3-6. Dependence of resistance coefficient ratio C_f/C_0 on bed roughness height d_s .

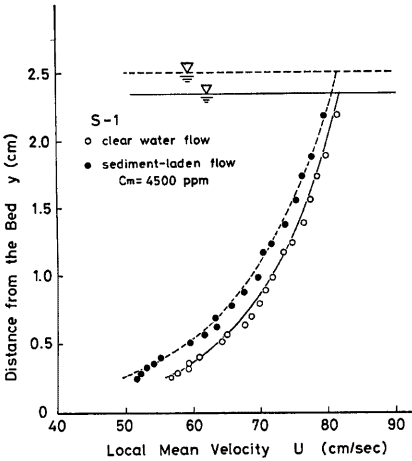


Fig. 3-7. Comparison between the velocity distributions of clear water flow and sediment-laden flow (smooth bed).

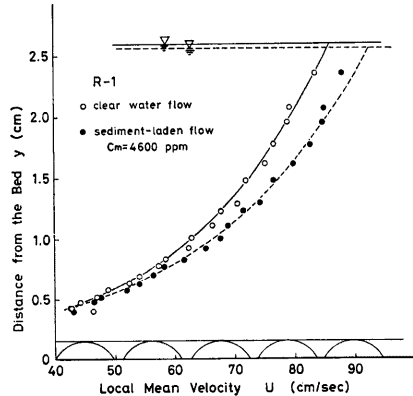


Fig. 3-8. Comparison between the velocity distributions of clear water flow and sediment-laden flow (rough bed).

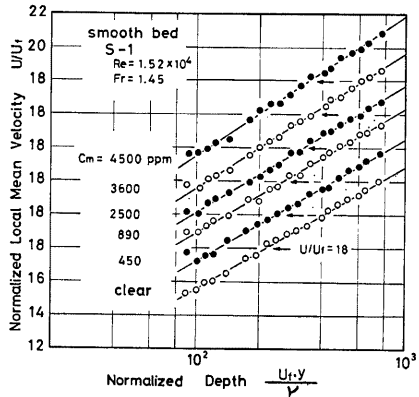


Fig. 3-9. Velocity distributions of clear water flow and sediment-laden flows (smooth bed, semi-log scale).

清水流に比し大きな水深を示すとともに、全水深にわたり速度が減少しているのに対し、粗面上の浮遊砂流では、小さな水深を示すとともに、速度は全水深にわたり増加している。また、浮遊砂流と清水流との同一高さにおける速度差に着目すると、滑面では路床近傍ほど速度減少が著しく、粗面では水面近傍ほど速度増加が著しくなっており、いずれの場合についても、速度勾配は浮遊砂流のものが大きくなるような分布性状を呈している。

Fig. 3-9 および **Fig. 3-10** は、それぞれ、滑面および粗面上の速度分布を片対数表示したものである。両図より、清水流および浮遊砂流の速度分布はいずれについても十分片対数近似でき、対数則の適合性の高いことが認められる。しかしながら、速度が対数的に変化するいわゆる対数則層 (log-law region) は $40\nu/U_f < y < 0.2H$ の領域であり²⁾、本実験における計測点は相対水深が $0.15 < y/H < 0.9$ の領域にあり、ほとんどがこの領域より上側の外部層 (outer layer) におけるものであるため、いわゆる対数則に用いられるカルマン定数および積分定数の値は、Nikuradse による円管流の実験より定められた値に一致するとは限らない。

3. 3 カルマン定数および積分定数

3. 2 で示されたように、滑面および粗面上の清水流ばかりでなく、浮遊砂流に対しても外部層における平均速度分布が対数則、すなわち、

$$\text{滑面: } \frac{U}{U_f} = A_s + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_f \cdot y}{\nu} \quad \left(\frac{U_f \cdot k_s}{\nu} < 5 \right) \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\text{粗面: } \frac{U}{U_f} = A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} \quad \left(\frac{U_f \cdot k_s}{\nu} > 70 \right) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

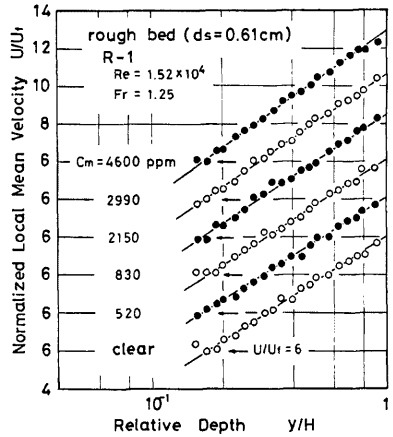
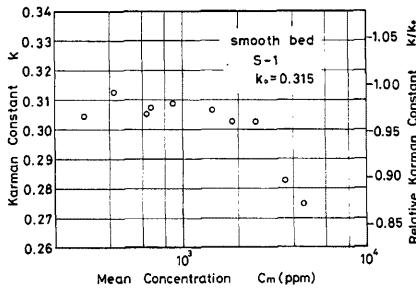
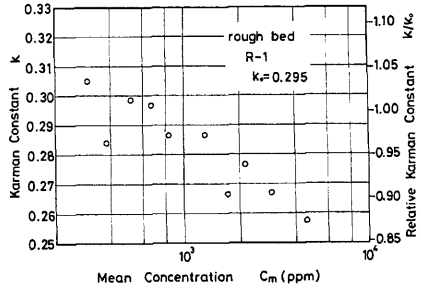


Fig. 3-10. Velocity distributions of clear water flow and sediment-laden flows (rough bed, semi-log scale).



(a)



(b)

Fig. 3-11. Relation between Karman constant κ and mean concentration C_m . (a): smooth bed. (b): rough bed.

ここに、 A_s および A_r は積分定数、 κ はカルマン定数、 k_s は相当粗度高を表す、を用いて十分近似されることが確認された。そこで、上式を用い、 $0.15 < y/H < 0.9$ の領域における計測値に最小自乗法を適用し、外部層におけるカルマン定数と浮遊砂濃度との関係を滑面および粗面に対して示したものが Fig. 3-11(a), (b) である。滑面および粗面ともカルマン定数は浮遊砂濃度の増加とともに減少する傾向を示している。この計測結果は従来からの知見と一致するものであるが、粗面上の浮遊砂流における計測結果を Vanoni⁹⁾ のものと比較すると次のようである。粗面上の清水流において、Vanoni の計測結果では $\kappa_0=0.372$ であるのに対し、本実験では $\kappa_0=0.295$ とかなりの違いがあるが、フルード数 F_r が 1.0~1.3 において κ は極小値を持つという福岡、吉川⁸⁾ の指摘を考慮すれば、この相違は理解できる。すなわち、Vanoni の実験における $F_r=0.93$ であるのに対し、本実験では $F_r=1.25$ であり、 κ が極小となる F_r 値に近いためと考えられる。このような清水流におけるカルマン定数の相違を考慮したうえで浮遊砂流におけるカルマン定数の変化に着目すると、本実験では $C_m \approx 3,000$ ppm において $\kappa/\kappa_0 \approx 0.9$ となっており、これは Vanoni の結果、すなわち $C_m \approx 3.3$ gr/l において $\kappa/\kappa_0 \approx 0.9$ という結果とよく一致している。

このように、滑面および粗面上の浮遊砂流におけるカルマン定数は清水流におけるものよりも減少することが確認されたが、次に、積分定数について検討すると次のようである。

Fig. 3-12(a), (b) は、それぞれ積分定数 A_s および A_r と平均浮遊砂濃度 C_m との関係を示したものである。ただし、 A_r の算定においては、 k_s は浮遊砂流においても不変で $k_s=d_s$ という仮定を置いている。図よりわかるように、 A_s は C_m の増加に伴って減少する傾向があり、これがカルマン定数の減少にもかかわらず、抵抗係数を増加させることになるものと考えられる。また、 A_r は C_m の増加に伴って増加する傾向があり、カルマン定数の減少と合わせて、抵抗係数を減少させることに結びついている。

Fig. 3-13 は、 A_r は浮遊砂流においても不変であると仮定して、 k_s と C_m との関係を評価したものである。このような仮定のもとでは、 k_s は C_m の増加とともに減少している。このことより、浮遊砂の存在によって路床粗度の影響が緩和されると考えれば、粗面上の浮遊砂流における抵抗係数の減少も理解できるものと思われる。

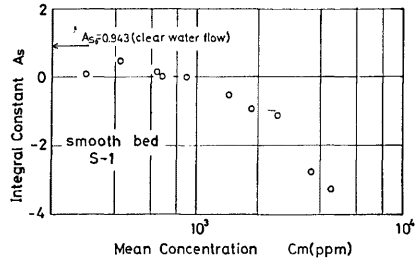


Fig. 3-12(a). Relation between integral constant A_s and mean concentration C_m .

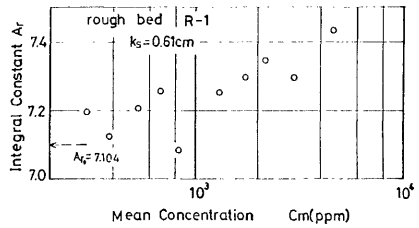


Fig. 3-12(b). Relation between integral constant A_r and mean concentration C_m ($k_s = \text{const.}$).

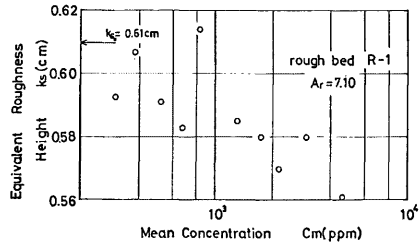


Fig. 3-13. Relation between equivalent roughness height k_s and mean concentration C_m ($A_r = \text{const.}$).

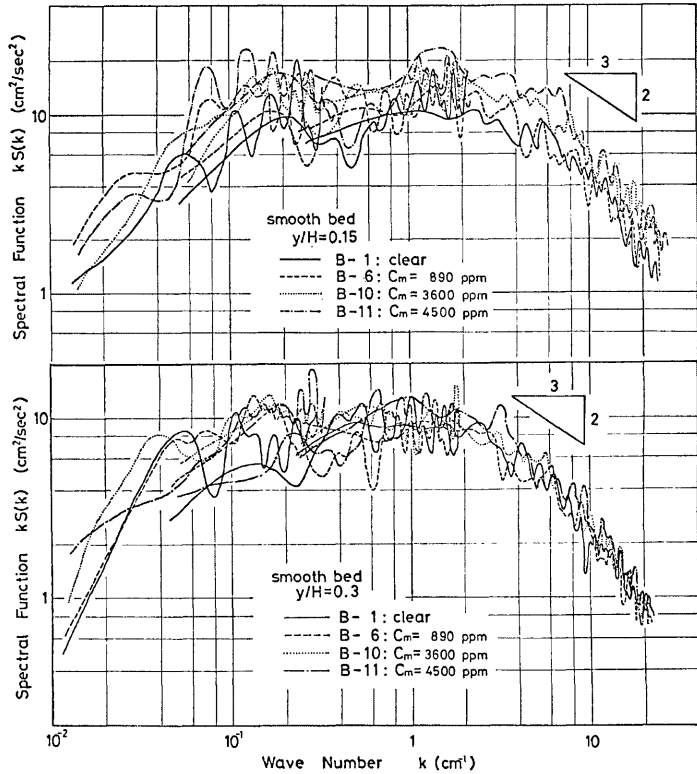


Fig. 4-1. Comparison between the spectra of clear water flow and sediment-laden flows (smooth bed).

4. 乱れ特性に関する検討

4.1 スペクトル特性

Table 2-1 に示された水力条件下において計測された流れ方向の乱れ速度に関する 1 次元エネルギースペクトルを波数表示し、清水流におけるものと比較すると Fig. 4-1 (滑面) および Fig. 4-2 (粗面) のようになる。なお、スペクトル計算は、データ数 $N=500$ とし、サンプリング周波数 $f_s=25, 100$ および 500 Hz、それぞれに対する繰返し数 $N_R=2, 4$ および 8 の 3 種を用いて行なわれている。滑面上の浮遊砂流についてみると、相対水深 $y/H=0.15$ では、浮遊砂濃度 C_m が比較的高くすると清水流におけるものより全体的にかなり大きくなり、 C_m の大きな浮遊砂流ほど大きな乱れエネルギーをもつことが認められるが、 $y/H=0.3$ では、いずれの C_m に対するスペクトルもほぼ同程度であって、清水流との顕著な差異は見出せない。このような傾向は粗面に対するものについてもほぼ同様である。

このように、平均浮遊砂濃度が $4,500$ ppm 程度でも路床近傍ではかなりの高濃度となるためスペクトル特性に顕著な変化を生じるのに対し、路床面から離れるにしたがって清水流のスペクトルに近づく傾向のあ

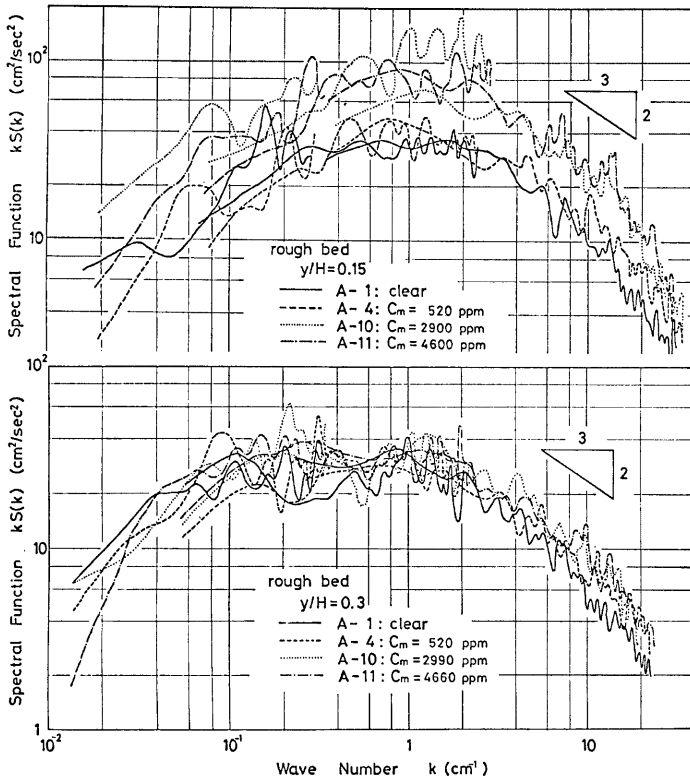


Fig. 4-2. Comparison between the spectra of clear water flow and sediment-laden flows (rough bed).

ることが確認される。

4. 2 乱れ特性量の鉛直分布

基本的乱れ特性量として、乱れの強さ u' 、時間対平均スケール T_B およびエネルギー逸散率 ϵ の3種を取上げ、それらの鉛直分布を清水流におけるものと比較検討する。なお、これら3量はそれぞれ次のようにして算定されている。 u' については u の r. m. s. 値より、 T_B は相関係数に認められる second mild maximum の発生遅れ時間より、 ϵ は慣性領域のスペクトルに相似則 $S(k) = S_0 \epsilon^{2/3} k^{-5/3}$ を適用し、 $S_0 = 0.47$ とし算定されている。

ところで、今本ら⁹⁾は清水流における乱れ特性量の普遍関数表示として、次式を提案している。

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{(i) } 0.1 < y/H \leq 0.6 \\
 \frac{u'}{U_f(U/U_f)^{1/3}} = 0.42 \left(\frac{y}{H}\right)^{-1/3} \\
 \frac{T_B}{H/U_f} = 0.115 \\
 \frac{\epsilon}{U_f^3/H} = 1.1 \left(\frac{y}{H}\right)^{-1}
 \end{array} \right\} \begin{array}{l}
 \text{(ii) } 0.6 < y/H < 0.9 \\
 \frac{u'}{U_f(U/U_f)^{1/3}} = 0.35 \left(\frac{y}{H}\right)^{-2/3} \\
 \frac{T_B}{H/U_f} = 0.115 \\
 \frac{\epsilon}{U_f^3/H} = 0.63 \left(\frac{y}{H}\right)^{-2}
 \end{array} \dots\dots\dots (4.1)$$

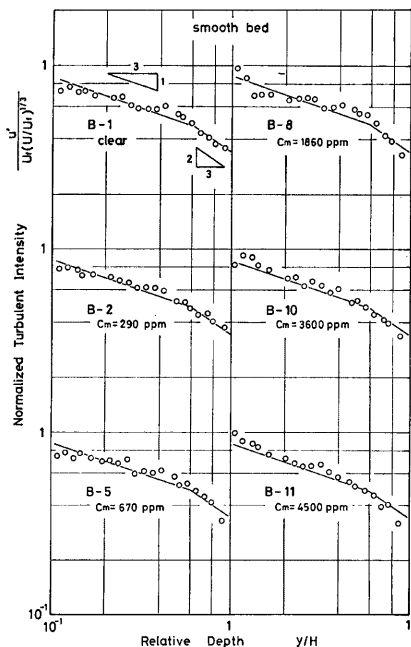


Fig. 4-3(a). Vertical distribution of turbulent intensity (smooth bed).

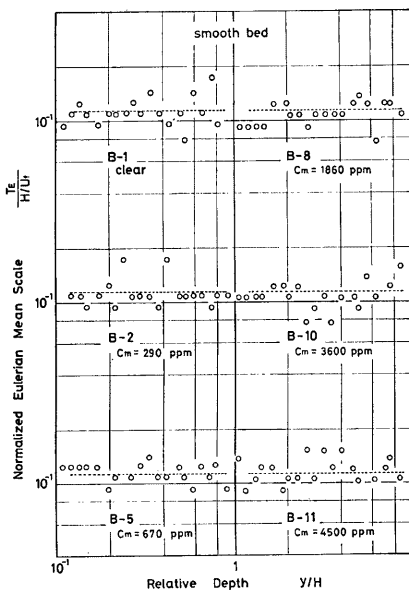


Fig. 4-3(b). Vertical distribution of Eulerian mean scale (smooth bed).

これらの普遍関数表示を用いて、本実験の計測結果を検討すると次のようである。

Fig. 4-3(a), (b), (c) は、それぞれ、滑面に対する u' , T_B および ε を (4.1) 式に基づいて普遍関数表示したものである。なお、それぞれの図における実線あるいは破線は全て清水流に対するものである。 u' および ε についてみると、平均濃度 C_m が比較的高くなると、相対水深 $y/H < 0.2$ の領域で清水流におけるものより大きめに逸脱し、この領域では u' および ε がかなり大きくなるが、 $y/H > 0.2$ の流れの大部分の間では清水流におけるものと顕著な変化を示さず、ほとんど一定とみなされる。次に、 T_B についてみると、計測値はかなりばらついているが、 C_m が変化しても T_B にはさしたる変化が現われていないようである。

以上のような傾向は、**Fig. 4-4(a), (b), (c)** に示された粗面に対するものからも同様に見だし、 $y/H < 0.2$ の領域では、 C_m の増加に伴って u' および ε が清水流のものより大きくなり、 T_B はほぼ全水深にわたりほとんど変化しないことが認められる。

このように、開水路浮遊砂流の乱れ特性は、路床近傍（本実験では $y/H < 0.2$ ）において顕著に変化し、それ以外の領域では清水流のものに極めて類似していることが明らかになった。

5. 濃度分布特性に関する検討

定常等流状態の2次元開水路流れにおいて、粒子が流体中に占める体積が無視できるような低濃度の場合には、浮遊砂の連続式として次式が与えられる¹⁰⁾。

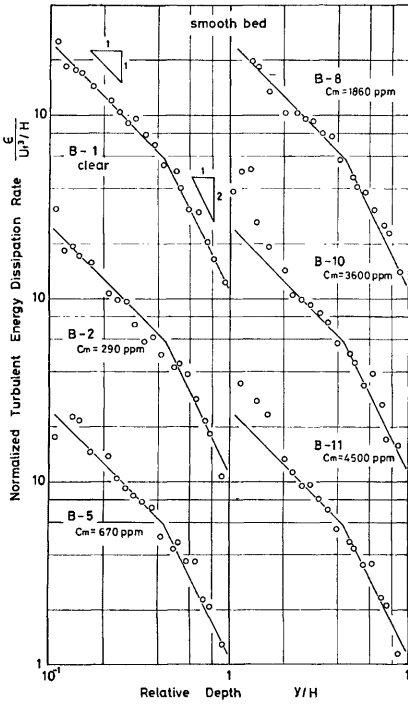


Fig. 4-3(c) Vertical distribution of turbulent energy dissipation rate (smooth bed).

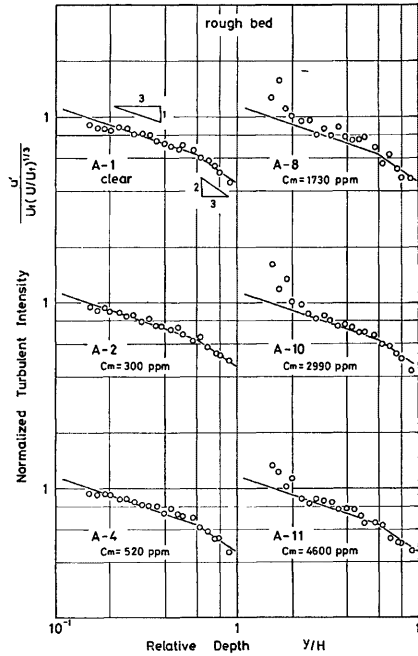


Fig. 4-4(a). Vertical distribution of turbulent intensity (rough bed).

$$E_s \frac{dc}{dy} + w_0 C = 0 \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここに、 C は沈降速度 w_0 をもつ粒子の路床からの高さ y における濃度、 E_s は粒子拡散係数を表わす。上式は、沈降速度によって下方に落ちる砂量と乱流拡散によって上方に輸送される砂量とが釣り合うことを示す基礎式であって、粒子拡散係数 E_s が y の関数として与えられるならば、この式より浮遊砂濃度分布式を得ることができる。

通常、レイノルズ・アナロジーを用い、 E_s が渦動粘性係数 E_m に比例するとして

$$E_s = \beta E_m \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

と表わされる。ここに、 β は比例定数である。 E_m は速度分布形に対応する数だけ関数形が存在し、したがって E_s も多様なものが考えられ、浮遊砂濃度分布式も各種のものがあるけれども、その中の代表的なものをまとめると **Table 5-1** のようになる。

表に示された3式のうち、Lane-Kaliske 式に比し Rouse 式および Zagustin 式の適合性が高く、また、本来一様砂を対象として誘導された分布式ではあるが、混合砂に対しても拡張して適用できることなどが知られており¹¹⁾、著者らの実験によっても同様なことが確認されている。また、実測濃度分布に対する Rouse 式および Zagustin 式の適合性は同程度であるが、式形の簡便性という観点からは Rouse 式の方が優れてお

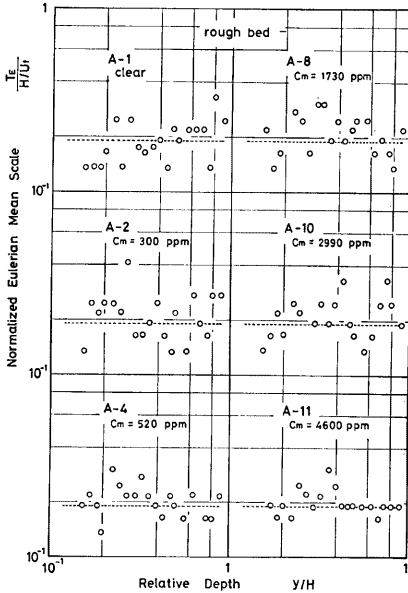


Fig. 4-4(b). Vertical distribution of Eulerian mean scale (rough bed).

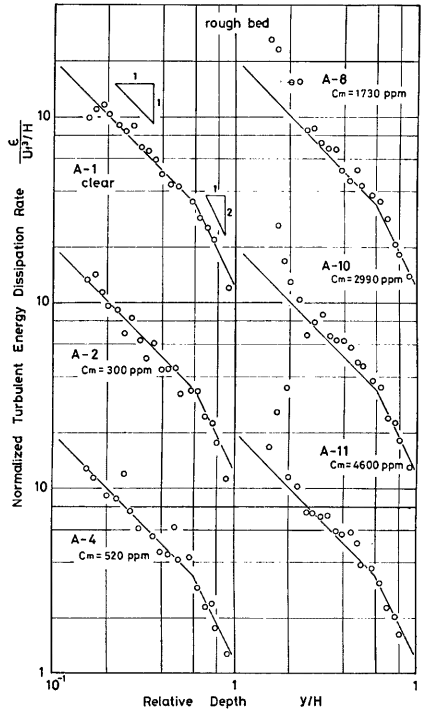


Fig. 4-4(c). Vertical distribution of turbulent energy dissipation rate (rough bed).

Table 5-1 Representative equation of suspended sediment distribution.

Investigator	Velocity distribution	Sediment transfer coefficient	Equation of sediment distribution
Rouse (1937)	$\frac{dU}{dy} = \frac{U_f}{\kappa y}$	$\beta U_f^2 (1-y/H) \frac{1}{dU/dy}$	$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{H-y}{y} \frac{a}{H-a} \right)^{2\beta}$
Lane-Kalinske (1941)	$\frac{dU}{dy} = \frac{U_f}{\kappa y}$	$\frac{1}{6} \beta \kappa U_f H$	$\frac{C}{C_a} = \exp \left(-6Z \frac{y-a}{H} \right)$
Zagustin (1968)	$\frac{dU}{dy} = \frac{3U_f}{\kappa H} \frac{(1-y/H)^{1/2}}{1-(1-y/H)^3}$	$\beta U_f^2 (1-y/H) \frac{1}{dU/dy}$	$\frac{C}{C_a} = \exp \{ -Z(\phi - \phi_a) \}$

$$\phi = \frac{1}{2} \ln \frac{\{ (1-y/H)^{3/2} + 1 \} \{ (1-y/H)^{1/2} - 1 \}^3}{\{ (1-y/H)^{3/2} - 1 \} \{ (1-y/H)^{1/2} + 1 \}^3} - \sqrt{3} \tan^{-1} \frac{\{ 3(1-y/H) \}^{1/2}}{y/H}, \quad Z = \frac{w_0}{\beta \kappa U_f}$$

$$C_a = C|_{y=a}, \quad \phi_a = \phi|_{y=a}$$

り、多くの場合、Rouse 式が実用されている。

このように、開水路浮遊砂流における水深方向の濃度分布に関しては、従来から理論的および実験的に検

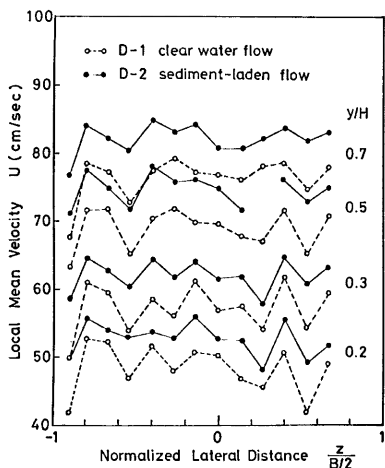


Fig. 5-1. Lateral distribution of mean velocity.

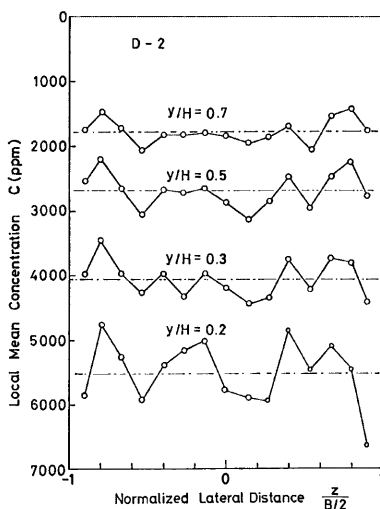


Fig. 5-2. Lateral distribution of suspended sediment.

討されてきており、その特性はかなり明らかにされているが、分布式中に含まれる指数 Z および基準濃度 C_c の決定には不明な点が数多く残されている¹²⁾。さらに、浮遊砂の横断方向分布（2次流との関係）に着目した研究は非常に少ないようであり、浮遊砂の濃度分布特性に関して、さらに詳細な検討を加える必要があるものと思われる。

本研究では、以上のような状況に鑑み、従来あまり注目されなかった2次流と浮遊砂濃度分布との関係について基礎的な実験的検討を加えることにする。なお、実験は底面粗度高 $d_s = 0.61$ cm の粗面上の流れを対象として行なわれ、その水理条件は **Table 2-1** に示されている。また、速度および濃度とも平均値評価時間は30秒にされている。

Fig. 5-1 は、清水流および浮遊砂流において計測された速度の横断方向分布を示したものである。計測は相対水深が0.2, 0.3, 0.5および0.7の高さで行なわれているが、粗面上の流れを対象としているため、各相対水深において、浮遊砂流の速度が清水流の速度よりも大きくなるとともに、横断方向に波状の分布を呈しており、波の山および谷の位置がどの相対水深に対してほぼ一定である傾向が認められる。

Fig. 5-2 は、浮遊砂濃度の横断方向分布を示したものであって、計測点は **Fig. 5-1** におけるものと一致している。先の速度の場合と同様に、濃度も横断方向に波状の分布を示し、波の山および谷の位置はかなり安定している。

以上の計測結果を基に、速度と濃度との関係を検討すると次のようになる。**Fig. 5-3** は、速度および濃度の横断分布を併示したもので、図においては速度および濃度ともそれぞれの相対水深における平均値で除し、基準化されている。図より、高速度部と低濃度部および低速度部と高濃度部とがほとんど一致するような分布状況が、いずれの相対水深においても認められ、2次流と濃度分布とは強い対応関係のあることが理解される。

しかし、これはあくまでも十分発達した乱流場における2次流と浮遊砂濃度との対応をみたものであり、

濃度分布が2次流に影響を及ぼすのか、それとも2次流が濃度分布に影響を及ぼすのかという発生発達機構に立入った検討を行なうことは今のところできず、今後、検討を加えていく予定である。

6. 結 論

本研究は固液混相開水路流れの水理特性を解明するための第一段階として、まず、土砂を浮遊した滑面および粗面上の開水路流れを取上げ、その抵抗特性、乱れ特性および濃度分布特性に関して、詳細な実験的検討を加えたものであって、得られた成果を要約して列挙すると次のようである。

- 1) 滑面上の浮遊砂流では、濃度の増加とともに抵抗係数が増大するが、粗面上では逆に減少する。
- 2) フルード数の小さな場合ほど1)の現象は顕著であるが、レイノルズ数はほとんど関与しない。
- 3) 浮遊砂流は清水流に比し、一般に速度勾配が大きくなるけれども、この場合、滑面上の流れでは路床近傍の速度減少が、粗面上の流れでは水面近傍の速度増加が特徴的である。

4) 開水路流れの速度分布は、清水流および浮遊砂流のいずれについても、外部層でも対数則表示が可能である。

5) この場合、見かけ上のカルマン定数は濃度の増加とともに減少するが、積分定数については、滑面流れのものが濃度とともに減少し、粗面流れのものは増加する。

6) 浮遊砂流の乱れ特性は、路床近傍で顕著に変化するが、その他の領域では清水流のものに類似している。

7) 路床近傍では、乱れの強さおよびエネルギー逸散率が増大する。

8) 浮遊砂濃度と2次流とは強い相関関係があり、高速度部と低濃度部および低速度部と高濃度部とがそれぞれ対応する分布状況を示す。

以上のように、本研究により開水路浮遊砂流の基本的特性についていくつかの興味ある結果が得られ、その水理特性はかなり明らかにされたが、今後においては、さらに中立粒子浮遊流へと研究を進め、固液混相開水路流れの水理特性の解明に役立てたい。

最後に、本研究の遂行に際し、実験ならびにデータ解析に協力された京都大学大学院生二宮純氏ならびに西園恵次氏に対し深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 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，1963，pp. 11-20.
- 2) 岸 力・板倉忠興：土木学会年次学術講演会講演概要集，1975-1978.
- 3) 松尾友矩・三村信男：土木学会年次学術講演会講演概要集，1977，1978.

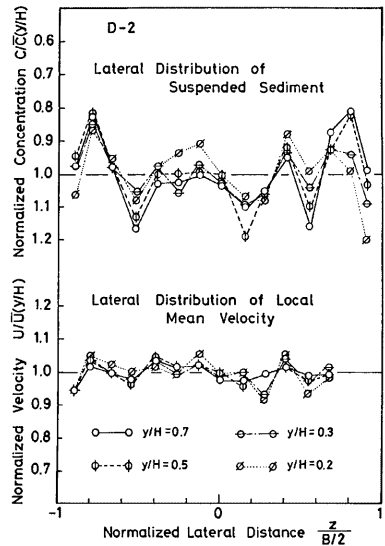


Fig. 5-3. Mutual relation between velocity and concentration.

- 4) 林 泰造・大山好永：中立浮遊粒子を含む開水路水流の乱流特性について，第23回水理講演会論文集，1979，pp. 131-138.
- 5) 大年邦雄：浮遊砂を含む開水路流れの水理特性に関する基礎的研究，京都大学卒業論文，1977.
- 6) Vanoni, V.A.: Transportation of suspended sediment by water, Trans. ASCE, Vol. 111, 1946, pp. 67-102.
- 7) Bradshaw, P.: Turbulence, Springer-Verlag, 1976.
- 8) 福岡捷二・吉川秀夫：Characteristics of open-channel flow with sediment, 東京工業大学土木工学科研究報告, No. 10, 1971, pp. 99-173.
- 9) 今本博健・浅野富夫：開水路流れにおける乱れの普通の特性について，第19回水理講演会論文集，1974，pp. 161-166.
- 10) Hunt, J.N.: On the turbulent transport of a heterogeneous sediment, Quarterly Jour. of Mechanics and App. Mathematics, Vol. 22, 1969, pp. 235-246.
- 11) 道上正規：流砂と河床変動に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1973.
- 12) Graf, W.H.: Hydraulics of sediment transport, McGraw Hill, 1970, pp. 161-189.