

電力中央研究所 正員 加藤正進 北海道大学工学部 学生員 〇左谷征美
 東京都 正員 高野一夫 建設省 正員 武内達夫
 北海道大学工学部 正員 岸 カ

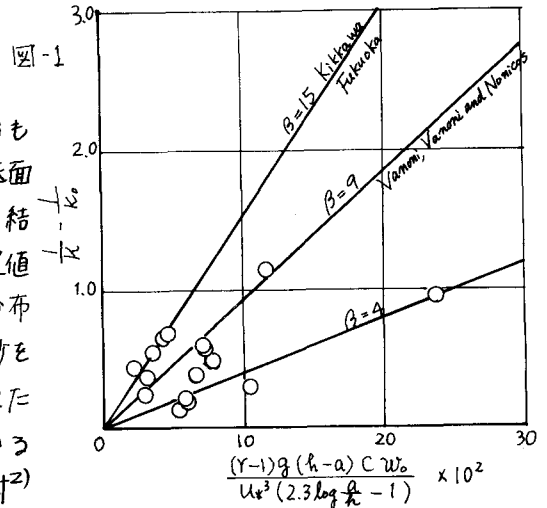
緒言 開水路中の浮遊砂を含んだ流れが、水理特性に及ぼす影響、特に Kármán 定数の濃度による変化、土砂流の流動拡散係数の分布と濃度分布との関係を調べた。又、粒径と Rouse 型分布との関係も調べ、従来の結果と比較した。浮遊砂量に関し、従来の諸公式による計算値と実験値とを比較して、諸公式の適合性を検討し、不備な点を上げ考察を行った。

1. 実験

本実験は、高さ 50 cm、巾 30 cm、長さ 15 m の可変勾配水路を用い、上流端に給砂装置を設けて、直接水路に砂を落し込む方法で行った。使用した砂は 50% 粒径 0.12 mm の 7 号珪砂である。濃度はサイフォンにより、流速と採取速度が等しくなるように取水して測定した。輸送量を測定する為に、次のような方法で実験を行った。あらかじめ、水路床に前述の珪砂を湿潤させて敷いておき、輸送による水深の変化、即ち水路床の変化を防ぐ為に、上流より砂を給砂した。しかし、厳密には水路床の変化が生ずる為に、この変化量を測定し、流速分布、濃度分布の決定の際に補正する事にした。ここで輸送量は、給砂量と通水前に水路に敷いた砂の換算重量から、通水後水路に残った砂の換算重量を引いたものとした。

2. 結果及び考察

(1) 流速分布は浮遊砂を含んだ場合も含みぬ場合も水深の 4 割近く対数分布が成立した。しかし、底面のごく近くでは、対数分布から上へはずれるという結果を得た。これは底部において拡散係数がある一定値を持つ為と思われる。浮遊砂を含んだ流れの流速分布は、Vanoni¹⁾等の実験で見られるように、浮遊砂を含みぬ場合より急勾配に変化している事が確かめられた。これは、Kármán 定数の減少を明らかに示している。濃度による Kármán 定数の変化を調べる為、志村²⁾の導いた次式で計算した結果を図-1) に示す。



K ; 濃度 C の Kármán 定数 w_0 ; 沈降速度
 K_0 ; 浮遊砂を含みぬ時の Kármán 定数 h ; 水深
 B ; 比例定数 u_* ; 摩擦速度
 C ; 濃度 a ; $\frac{u_* D}{11.6}$
 g ; 重力加速度 γ ; 砂の単位体積重量

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_0} + \frac{BC(\gamma-1)g w_0 (h-a)}{u_*^2 (2.3 \log \frac{z}{a} - 1)}$$

図(1)の結果はKármán定数の濃度による変化に良く表わしている。著者らの実験結果では比例定数Bは $4 < B < 15$ であった。

(2) 測定した濃度分布が図(2)の結果を得た。濃度分布は流速の対数分布が成立する区間では、良くRouse型分布に一致する。対数分布のいずれの区間でも、濃度分布はRouse型分布よりも、拡散係数を一定、即ち指数分布型に近いようである。この傾向を図(2)に示すが、この図より上部部の土砂流の拡散係数として近似的に次式を得る。

$$E_s = \frac{1}{2} u_* h$$

E_s 土砂流の拡散係数

3) Ismailは閉管路で浮遊砂の実験を行ったが、断面の中心部ではとは理論的にはつたはずであるが、実際にはある一定値を持つと報告している。一般的に

上部部では流速の変化は小さく、free turbulenceの状態に近いと推定されるから、 E は一定値を取ると考えられ、濃度分布は指数分布に近くなると思われる。濃度分布から周知の濃度平衡式を用いて E_s を逆算した結果は図(3)に示されるとおりで、上部部ではばらつきが多いが拡散係数が一定に近くなる傾向を示す。土砂流の拡散係数が運動量拡散係数の β 倍になるとすれば、この β は、濃度*

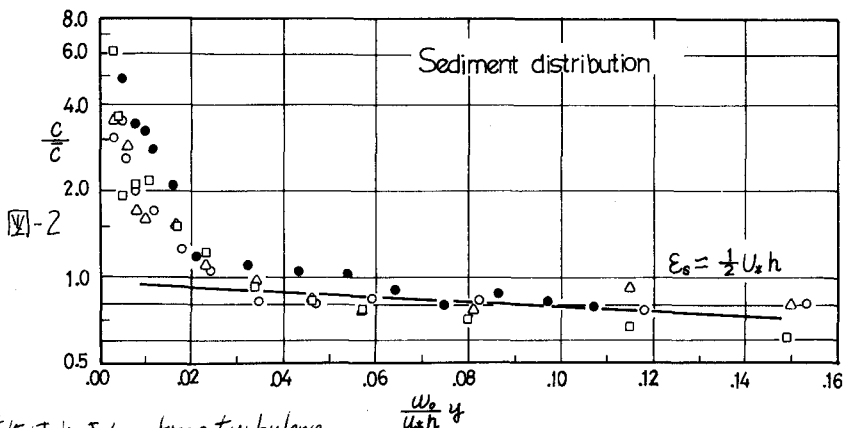
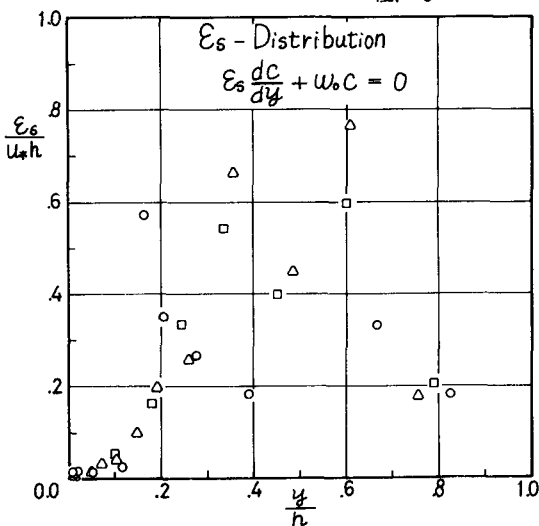


図-3



分布勾配 Z_m と理論勾配 $Z = \frac{u_0}{K u_}$ の比で表わされる。本実験の場合図(4)に示す通り、 $1.3 < \beta < 1.5$ と考えられ、 $Z_1 = (1.3 \sim 1.5) Z_m$ 即ち $E_s = (1.3 \sim 1.5) E_m$ が成立する。ここで E_m は運動量拡散係数を示す。 β の値は粒径により変化する事がIsmailにより報告されている。

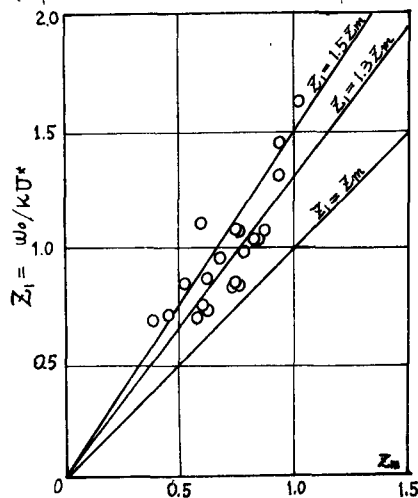


図-4

(3) 本実験により得られた輸送量の実測値と Einstein 及び Lane & Kalinske の理論による計算値とをいろいろな場合に分けて表 (1) に示す。末項には実測の濃度分布と流速分布とを圧分積分して得た値を載せた。Einstein 公式による計算は次の 4 つの場合を行い浮遊砂量 q_s , 全輸送量 Q を求めた。

- i) q_{s1} ; u_*' Z =測定値 $Ca = 1.0 q_{s0} / 11.6 u_*'$
- ii) q_{s2} ; u_*' $Z = \omega_0 / 0.4 u_*'$ $Ca = 1.0 q_{s0} / 11.6 u_*'$
- iii) q_{s3} ; u_*' $Z = \omega_0 / K' u_*'$ $Ca = 1.0 q_{s0} / 11.6 u_*'$
- iv) q_{s4} ; u_*' Z =測定値 $Ca = 0.02 h$ における実測値

ここに、 u_*' : 砂連の影響を考えた摩擦速度

1.0 : 与えられた粒径の土砂の掃流砂の中心にある割合

Ca : a 点における濃度

q_{s0} : 掃流砂量

a : 実測と際では粒径の2倍

K' : u_*' を用いた時実測流速分布より得た Karman 定数

次に Lane & Kalinske 式による場合は2つである。

- i) q_{s1} ; u_*' $Z = \omega_0 / K' u_*'$ $Ca = 5.55 P^{1.61}$
- ii) q_{s2} ; u_*' $Z = \omega_0 / 0.4 u_*'$ $Ca = 0.02 h$ における実測値

$$\text{但し } P = \frac{1}{2} \frac{u_*'}{\omega_0} \exp\{-(\omega_0 / u_*')^2\}$$

表 (1) より次の事が認めらる。

1) Einstein の計算値は、 Z の値により大きく変化する。

即ち実測の Z と取るか、 $Z = \omega_0 / 0.4 u_*'$ を用いるかにより変化する。後者の方が大きい値を与える。

2) Lane & Kalinske 式で $Ca = 5.55 P^{1.61}$ を用いた場合、計算値は約 $1/8 \sim 1/10$ となる。 Ca の値の変化は P の変化よりも輸送量に大きな変化を与えると思われる。

3) 同一 Ca における Lane & Kalinske の計算値は Einstein のより大きな値を示す。これは用いた濃度分布の違いによるものと思われる。

(4) 浮遊による輸送理論に関する問題点を上述の2公式について考察した。

1) Lane & Kalinske 理論 全断面に亘り、 u_*' が一定値を持つという仮定のもとに公式を導いているが、この考えが成立するのには一般的には濃度が薄い上層部であるから、大きな欠点が生ずる事は明かである。河床付近の濃度分布式において、係数を河川の実測値より求めているが、吉川の例

	実測値 q_{s0}	u_*'	K	u_*'	K'	Einstein			
						q_{s1}	q_{s2}	q_{s3}	q_{s4}
						q_{s1}	q_{s2}	q_{s3}	q_{s4}
Run 28	2.15	4.48	0.326	3.07	0.224	6.19	6.93	8.82	9.22
29	3.76	4.62	0.314	3.40	0.231	8.46	9.46	17.95	18.51
30	2.84	4.28	0.334	3.33	0.260	7.13	7.96	16.34	16.92
31	3.39	4.38	0.384	3.28	0.288	4.20	4.90	15.18	15.68
	Einstein				Lane & Kalinske				積分値 Q
	q_{s1}	q_{s2}	q_{s3}	q_{s4}	q_{s1}	q_{s2}	q_{s3}	q_{s4}	
Run 28	1.87	2.59	1.42	1.82	0.174	0.303	4.50	4.76	2.27
29	4.16	5.16	1.17	1.74	0.279	0.423	4.56	4.83	2.31
30	5.53	6.36	2.99	3.53	0.283	0.323	8.72	8.76	2.94
31	6.96	7.66	2.51	3.30	0.261	0.396	10.69	10.92	3.60

単位流砂量 $q_{s0}/\text{sec-cm}$

定では異った係数値を与えている。著者らの実験においても図-(5)に示す様に、理論的に不備ではあるが、異った実験式を得る。

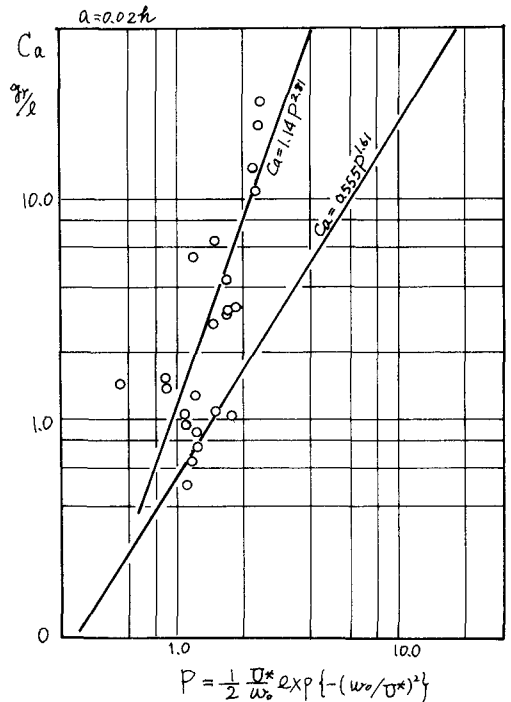
$$Ca = 1.14 P^{2.8} \quad (9\% \text{ 誤差})$$

加えて定義より $Ca/F(w_0) \propto P$ のはずであるから Ca が指数型となるのは疑問であり、流砂量公式としては Lane & Kalinske 式は適格ではないと思われる。

2) Einstein 理論 運動量の拡散係数と土砂流の図-5

Relation between Ca and P

拡散係数は前述の如く $\beta E_m = E_0$ なる関係が認められる。従って Σ の値は、 $\Sigma = \frac{w_0}{\beta K U_*}$ と表わされるべきである。又流速分布や砂速の影響を考慮した摩擦速度を求める場合、 K の減少を無視している事は、かなり大きな影響を与える。この事は Vanoni も指摘している通りである。しかしながら、 β は粒径により変化し、移動床の摩擦速度を計算する適確な方法が今の所無く、 K が濃度の大きさにより変化する事等より Σ の値は実験の Σ_m を用いるべきであろう。従って、今の所、Einstein 公式の補正としては、 Σ_m を Σ に用いる事と、全体に 0.4% を掛けて補正する事にとどまる。



今後の課題としては下記の点が上げよう。

- 1) 流速分布の底面での対数分布か否かは、明らかにする事
- 2) 移動拡散係数の分布を明確にする事
- 3) 底面付近の濃度の絶対値を、水理量を用いて表わす事
- 4) 浮遊と掃流の境界点 a を決定する事
- 5) 移動床の U_* の算定方法をはっきりさせる事
- 6) Lane & Kalinske 公式を定義に戻って考察し、新しい式と導く事

参考文献

- 1) Vanoni, V.A. : Transportation of Suspended Sediment by water
Trans. ASCE, Vol 111, 1946
- 2) 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, 1957
- 3) Ismail, H.M. : Turbulent transfer mechanism and suspended sediment in closed channels
- 4) 吉川秀夫 : 浮遊流砂量に関する二、三の考察
土木研究所報告, 第23号, 1952