

## 32 急勾配粗面水路における浮遊砂の運動機構に関する実験的研究

アジア航測(株)

○ 北原 一平

建設省土木研究所 石川 芳治、井良沢 道也

(財)砂防・地すべり技術センター 宮本 邦明

### 1. はじめに

砂防ではこれまで主として掃流砂を取り扱ってきた。しかし、砂防で対象とする山地河川は掃流力が大きいため、下流では掃流砂となるような粒径の砂礫も浮遊形態で運搬され、場合によってはアーマコート上の浮遊砂のように掃流砂を伴わない浮遊砂のみの流れも考えられる。したがって下流河道における河床変動を考えるとき、山地河道における掃流砂の挙動のみならず浮遊砂の挙動を把握することは重要なことである。山地河川の特徴は勾配が急で河床材料の粒度分布の幅が広いことである。するためにフルード数、相当粗度 $ks$ が大きく、水深と相当粗度の比、相対水深 $h/ks$ が小さく、相当粗度(あるいはそれを規定している河床材料の代表粒径)が浮遊砂の粒径よりはるかに大きいという特徴をもつ。

浮遊砂の挙動は流れの構造と密接な関係にある。そこで、本研究では流れの構造と浮遊砂の特性を評価するため、拡散理論をもとに実験的な検討を行う。

拡散理論によれば、浮遊砂の特性は浮遊砂の拡散係数 $\varepsilon_s$ と基準面濃度 $C_0$ で評価される。また、流れの構造と浮遊砂の特性との関係は流れの運動量拡散係数と浮遊砂の拡散係数により議論される。浮遊砂の拡散係数 $\varepsilon_s$ は一般に流れの運動量拡散係数(渦動粘性係数) $\varepsilon_n$ とほぼ等しいと考えられており、 $\varepsilon_s$ の空間分布の把握は $\varepsilon_n$ の空間分布を検討することによって行われる。渦動粘性係数 $\varepsilon_n$ は

$$\tau = \varepsilon_n (du/dy) \quad (1)$$

で定義される。せん断応力 $\tau$ の分布は三角形分布と考えられるから $\varepsilon_n$ は

$$\varepsilon_n (du/dy) = u_*^2 (1-y/h)(1/(du/dy)) \quad (2)$$

となる。

流速分布を対数則で近似すると

$$du/dy = u_* / \kappa y$$

であるから $\varepsilon_n$ は

$$\varepsilon_n = \kappa y (1-y/h) \quad (3)$$

とRouse式の渦動粘性係数の分布となる。

式(3)を断面平均すると

$$\varepsilon_n = \kappa u_* h / 6 \quad (4)$$

とLane-Kalinske型

の渦動粘性係数の分布となる。

浮遊砂の拡散係数は、渦動粘性係数にほぼ等しいからこのような渦動粘性係数の分布形の相違は漂

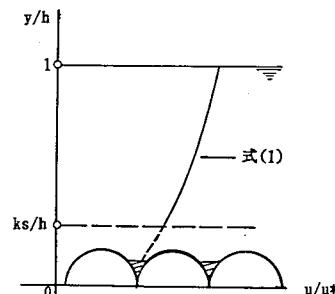


図1 急勾配粗面上の流速分布

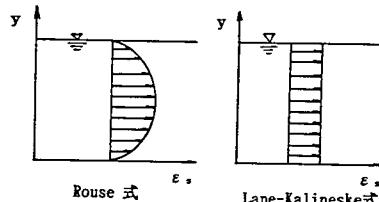


図2 各モデルの $\varepsilon_n$ の分布

度分布形の違いを生む。また、式(3)、(4)から、渦動粘性係数は、流れの抵抗則を対数則で評価した場合の $\kappa$ 、 $k_s$ 等のパラメータと関係しており、流れの構造の抵抗の大きさと釣り合っていなければならぬ。そこで、本研究では、実験結果を流れの抵抗、渦動粘性係数の分布、そして濃度分布、基準点濃度の順に調べていく。

## 2. 実験方法

実験装置に用いた水路は図3にしめすような水路幅30cm、高さ50cmの可変勾配の水路である。

給砂はベルトコンベアとホッパーにより定常かつ横断方向に均等になるよう行った。粗度板は直径6mmのプラスチック玉及び20mmのガラス玉をそれぞれシリコンによってラワン材に固定した。実験はポンプによって一定量の水を流し、給砂を行い、平均水深、水深方向の土砂濃度分布、流速分布を測定した。また、流況観察のためにビデオ及び写真撮影を行った。

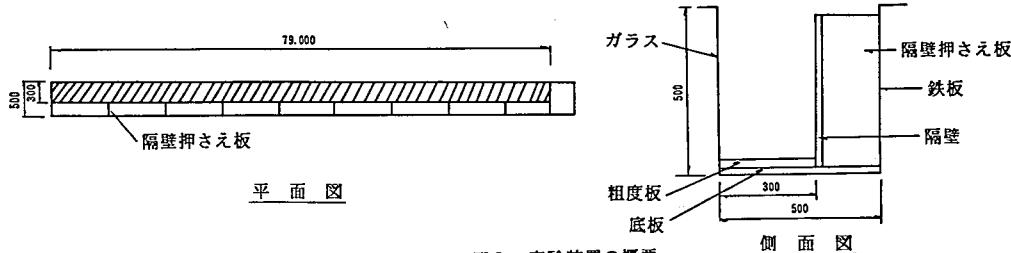


図3 実験装置の概要

表1に検討の対象とした実験条件を示す。実験は、粗度2種類(6,20mm)、勾配3種類(1/50,1/20,1/10)、流量2種類(5,20 l/s)、給砂量4種類で計50種類の実験を行った。

表1 検討の対象とした実験ケースと実験結果

No	粗度 (mm)	勾配 1/n	水深 (cm)	流速 U* (m/s)	流速 W/o (m/s)	底土砂濃度 (%)	V/U*	W/o/U*	ks/d	No	粗度 (mm)	勾配 1/n	水深 (cm)	流速 U* (m/s)	流速 W/o (m/s)	底土砂濃度 (%)	V/U*	W/o/U*	ks/d
1	6.0	50.19	2.293	0.067	0.0689	10.76	0.378	0.35	25	6.0	50.18	5.097	0.100	0.1436	12.79	0.254	0.30		
2	6.0	50.19	2.265	0.067	0.1049	10.97	0.380	0.33	26	6.0	50.18	5.058	0.099	0.3704	12.94	0.255	0.29		
3	6.0	50.19	2.169	0.065	0.1878	11.71	0.389	0.25	27	6.0	50.18	4.983	0.099	0.3281	13.72	0.256	0.27		
4	6.0	50.19	2.173	0.065	0.4480	11.68	0.388	0.20	28	6.0	50.18	4.907	0.098	0.4788	14.05	0.258	0.25		
5	20.0	50.50	2.745	0.073	0.0619	8.16	0.347	0.40	29	20.0	50.50	6.265	0.110	0.0304	9.36	0.299	0.60		
6	20.0	50.50	2.705	0.072	0.0932	8.35	0.349	0.35	30	20.0	50.50	6.106	0.108	0.1101	9.73	0.232	0.48		
7	20.0	50.50	2.736	0.073	0.1344	8.20	0.347	0.34	31	20.0	50.50	6.052	0.108	0.1770	9.86	0.233	0.40		
8	20.0	50.50	2.823	0.074	0.1942	8.03	0.342	0.33	32	20.0	50.19	5.605	0.105	0.4512	11.31	0.242	0.33		
9	6.0	19.83	1.796	0.094	0.4869	9.89	0.269	0.30	33	6.0	19.97	3.991	0.140	0.1960	12.03	0.181	0.40		
10	6.0	19.83	1.805	0.094	0.2322	9.82	0.268	0.32	34	6.0	19.97	4.055	0.141	0.1022	11.75	0.179	0.42		
11	6.0	19.83	1.782	0.094	0.7240	10.02	0.270	0.25	35	6.0	19.97	4.118	0.142	0.2854	11.49	0.178	0.42		
12	6.0	19.83	1.730	0.092	1.4807	10.47	0.274	0.22	36	6.0	19.97	4.053	0.141	0.4696	11.75	0.179	0.37		
13	20.0	19.97	2.304	0.106	0.0774	6.73	0.238	0.55	37	20.0	19.97	4.949	0.156	0.1833	8.55	0.162	0.60		
14	20.0	19.97	2.309	0.106	0.1705	6.77	0.238	0.47	38	20.0	19.97	4.787	0.152	0.4273	8.99	0.163	0.60		
15	20.0	19.97	2.226	0.105	0.2722	6.97	0.240	0.45	39	20.0	19.97	4.709	0.152	0.8521	9.04	0.166	0.54		
16	20.0	19.97	2.237	0.105	0.3806	7.10	0.241	0.53	40	20.0	19.97	4.907	0.155	0.3715	8.50	0.163	0.65		
17	6.0	10.32	1.525	0.120	0.3459	9.35	0.210	0.30	41	6.0	10.32	3.585	0.184	0.1335	10.03	0.137	0.53		
18	6.0	10.32	1.571	0.122	0.8383	8.66	0.207	0.26	42	6.0	10.32	3.567	0.184	0.3363	10.10	0.137	0.50		
19	6.0	10.32	1.571	0.122	1.7313	8.60	0.207	0.23	43	6.0	10.32	3.521	0.183	0.4950	10.26	0.138	0.60		
20	6.0	10.32	1.570	0.122	2.8619	8.61	0.207	0.22	44	6.0	10.32	3.539	0.183	0.6548	10.22	0.138	0.48		
21	20.0	10.01	1.995	0.140	0.5870	6.01	0.181	0.55	45	20.0	10.01	4.240	0.204	0.3237	7.62	0.124	0.85		
22	20.0	10.01	2.095	0.143	0.9623	5.59	0.177	0.53	46	20.0	10.01	4.236	0.204	0.6725	7.63	0.124	0.83		
23	20.0	10.01	1.947	0.138	2.0945	6.23	0.183	0.40	47	20.0	10.01	4.568	0.211	0.5677	6.81	0.120	0.38		
24	20.0	10.01	1.898	0.136	1.4893	6.47	0.186	0.42	48	20.0	10.01	4.102	0.200	1.1741	8.01	0.126	0.75		
						50	20.0	19.97	1.848	0.095	0.7737	9.46	0.266	0.30					

V : 平均流速、W/o : 粒子の次序度灰度、k : 相当粗度、d (0.2 mm) : 頭径

## 3. 実験結果

### 3.1 流れの構造

#### (1) カルマン定数と相当粗度

流れの構造と抵抗則を対数則で評価し、カルマン定数と相当粗度で評価する。例として図4にケース25及び31の流速分布を示す。図中の斜めの直線は $\kappa=0.4$ としたときの対数則式を、横軸に平行な直線は $U/U_* = 8.5$ を、縦軸に平行な直線は水面である $h/K_s$ を示す。したがって、対数則式の直線と $U/U_* =$

8.5は $y/K_s=1$ で交差する。 $K_s$ の値は実測の流速と対数則式とが一致するように試行錯誤により定めた。なお理論河床は粗度の頂部から粗度径の20%下方に設定した。実験結果の $\kappa$ と $K_s$ の評価から以下のことことが分った。

- ① 流速分布は対数則でほぼ説明され、カルマン定数 $\kappa$ はほぼ0.4の値をとる。
- ②  $K_s$ の値は $K_s/d$ が0.2~0.88の間にあり平坦河床のそれとほぼ同じ値をとっている。また、給砂濃度が高いほど $K_s/d$ は小さくなる傾向にある。
- ③ これは、 $h/K_s=1.8$ から32.7のすべての実験に対して成り立つ。

#### (2) 漩渦粘性係数

浮遊砂拡散係数 $\varepsilon_n$ のRouse式およびLane-Kalinske式はそれぞれ式(3)、式(4)で表される。実験で得られた $\varepsilon_n$ とこれら2つのモデルの $\varepsilon_n$ を比較し、急勾配粗面水路の流水の渦動粘性係数の空間分布特性を評価する。

実験の $\varepsilon_n$ は次式により求めている。

$$\varepsilon_n = g(h-y)i/(du/dy) \quad (5)$$

式(5)を用いて実験結果から得られた $\varepsilon_n$ と式(3)、(4)との比較を行った例をケース25と31について図5に示す。この例では実測の $\varepsilon_n$ はRouse式に近い分布となっているがケース25は水面と底面付近を除くある幅にわたってある程度Lane-Kalinske式に近く分布しているとみることもできる。ケース31はほとんどRouse式と一致している。

実験の範囲を通して $\varepsilon_n$ の分布は以下のようない性質をもつ。

- ① 一般的にRouse型の分布をもつものが多い。
- ②  $h/K_s$ が大きくなるとLane-Kalinske型の分布をもつようになる。もっとも、 $h/K_s$ が非常に小さい場合などのように $\varepsilon_n$ の値がばらついていてどちらともとれない場合もあるがいずれの場合も数値的には両者と同じ程度の値をとる。

#### 3.2 土砂濃度分布

土砂濃度分布のRouse式とLane-Kalinske式は次式で示される。

$$c_s/Ca = \{((h-y)/y)(a/(h-a))\}^2 \quad (6)$$

$$c_s/Ca = \exp\{-6Z(y-a)/h\} \quad (7)$$

$$Z = \omega_0 / \beta \kappa U.$$

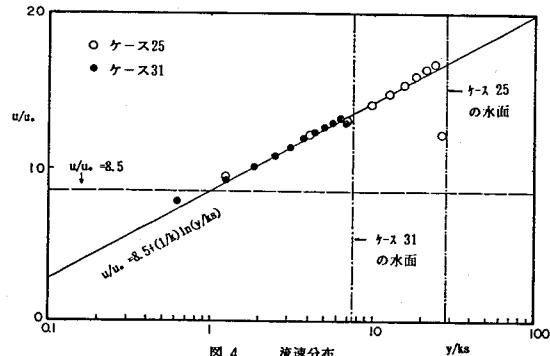


図4 流速分布

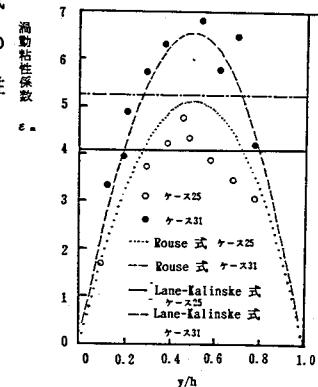


図5  $y/h$  と渦動粘性係数の関係

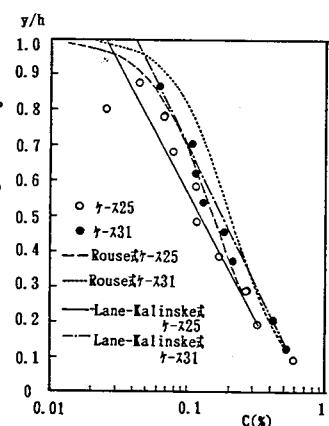


図6 土砂濃度分布

実測の土砂濃度分布と式(6)、(7)を比較し、既往モデルの適合性を検討した。図6に例としてケース25及び31を示す。横軸は土砂濃度を対数表示し、縦軸は相対水深をとった。式(6)、(7)より濃度分布を求

める際の基準面高と基準面濃度は式が実測値と一致するように実測の深さと濃度の組合せを試行錯誤により与えた。実測の土砂濃度分布は $\epsilon_s$ の分布と同様全体としてはRouse式に近いと判断されるものが多い。 $h/ks$ が大きいとLane-kalinske式に近いものが多い。すなわち、粗度が6mmの場合にLane-kalinske式に近いものが多く、粗度が20mmの場合はRouse式に近いものが多い。いずれにしても分布形はRouse、Lane-kalinskeの濃度分布形と似た分布形をとる。

### 3.3 基準面濃度

浮遊砂の基準面高に関する既往の研究ではほとんどが慣用的に $0.05h \sim 0.1h$ を用いているのが現状である<sup>3)</sup>。浮遊砂の基準面高の定義はその理論により様々であり、また既往の研究のほとんどがさほど粗度が大きくなかった条件における理論実験についてである。本研究では相当粗度 $ks$ を基準面高としRouse式およびLane-kalinske式の内、実験値と適合性のよい方の式によって基準面濃度を算定した。図7に $Ca$ と $\omega_s/u_s$ 及び $ks/d$ の関係を示す。 $\omega_s/u_s$ は土砂の流水に対する追随性と流水の土砂を巻き上げる力の強さとの比であるから給砂条件が同一であれば $\omega_s/u_s$ が小さいほど $Ca$ は大きくなる。ところで本実験のように $ks$ が粗度間の堆積面の高さ、ひいては給砂濃度によって変化するため、給砂濃度の違いによって $ks$ を評価し、基準面濃度を評価する必要がある。そこで $ks/d$ によって $Ca$ と $\omega_s/u_s$ の関係を層別した。図7をみると層別された一つ一つの層の中では $Ca$ と $\omega_s/u_s$ の関係は前述のとおりになっているが、層と層の関係をみると $ks/d$ の値が小さくなるほど $Ca$ は大きくなっているのが分る。これは給砂量が多いほど粗度間に土砂が堆積し、 $ks/d$ が小さくなり、一方ではそれに対応して基準面濃度が高くなることを表している。このように $ks$ は浮遊砂成分がどの高さまで粗度間に堆積しているかを示す重要な指標である。なお、図中には基準点の位置が必ずしも一致していないが、既往の研究で得られた実験値も示した。

### 4.まとめ

急勾配粗面水路の浮遊砂の流れの構造について $\kappa$ 、 $ks$ 、 $\epsilon_s$ を検討することによって対数則で評価できることを確認した。浮遊砂の土砂濃度分布については $\epsilon_s$ と $\epsilon_b$ の相似性が満たされていること、ほぼRouse-Kalinske型の濃度分布型をとることが分った。また、基準面濃度 $Ca$ を $y=ks$ で求め、 $Ca$ が $\omega_s/u_s$ と給砂濃度の指標である $ks/d$ の関数として表されることを確認した。今後は給砂量の違いによる基準面濃度の与え方、急勾配水路における浮遊砂形態と掃流状集合流動、高濃度流との境界について検討を行っていきたい。

参考文献 1)Rouse,H.:Modern conceptions of the mechanics of turbulence,Trans.ASCE,Vol.102,pp.463~543,1937 2)Lane,E.W.and A.A.Kalinske:Engineering calculations of suspended sediment,Trans.AGU,Vol.22pp.307~603,1941 3)芦田和男、道上正規：浮遊砂に関する研究(1) 京都大学防災研究所年報、第13号、1970

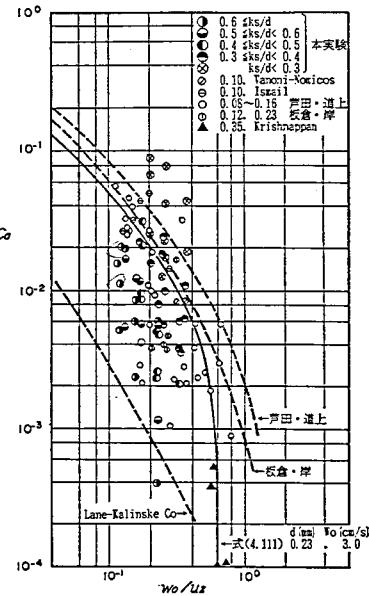


図7 基 準 面 濃 度  
基 準 面 高 =  $ks$