

20 急勾配粗面上の浮遊砂

東京大学農学部	○権田 豊
東京大学農学部	太田 猛彦
建設省土木研究所	石川 芳治
(財)砂防・地すべり技術センター	宮本 邦明
河川情報センター	井良沢 道也

1. はじめに

砂防ではこれまで掃流砂を主に取り扱ってきたが、近年山地河川における浮遊砂の重要性についても認識されるようになってきた。浮遊砂量は、流速と浮遊砂濃度の積を水深にわたって積分することで得られる。流速分布は、対数則流速分布式が成り立つことが広く知られており、浮遊砂量算出の精度はいかに浮遊砂の濃度分布を算出するかにかかっている。現時点で濃度分布のモデルは様々あるが、水の乱れと浮遊砂の挙動の関係が不明瞭なこと、濃度分布を得るために基準点濃度を与えなければならないが基準点の位置が曖昧であることなどが共通した問題である。また、浮遊砂に関して平地河川を想定した実験は多く行われているものの、砂防の対象である山地河川を想定した実験は少なく、急勾配で河床がアーマコートが覆われているような状態での浮遊砂の挙動は解明されていない。そこで本研究では急勾配粗面水路を用い、理論河床上に堆砂が見られないほぼ固定床と見なせる条件で実験を行い、拡散モデルをもとに実験結果の検討を行った。

拡散モデルでは、浮遊砂の濃度分布は拡散係数 ε_s と基準面濃度 C_a に規定されている。拡散係数 ε_s は、浮遊砂の拡散が水の運動量拡散と同じプロセスで起こると考えられているため、水の運動量拡散係数 ε_m を用いて、

$$\varepsilon_s = \beta \varepsilon_m \quad (1)$$

と表現されている。ここで出てくる比例係数の β はほぼ一定の値をとるとされているが、全水深にわたって一定であるのか、それとも断面平均量として一定であるのかその点が明確でない。一方、基準面濃度 C_a の推定で重要なのは、基準面の位置をどこに設定するかであるが、従来基準点を便宜上、河床から水深の5%上の位置にすることが多く、その理論的根拠が乏しいのが現状である。そこで本研究では、浮遊砂と乱れの関係および基準面の位置を明確にするため、運動量拡散係数 ε_m と拡散係数 ε_s の関係および基準面と流れの構造の関係について検討を行った。

2. 実験の概要

実験には長さ8m、幅30cm、高さ50cm、片方の側面がガラス製の可変勾配水路を用いた。水路底面には、直径2.0cmのガラス玉を粗度として固定した。使用した砂は、平均粒径0.1mmと平均粒径0.2mmの砂で、水路上流端より給砂した。水路勾配は1/50、1/20、1/10、流量は5.20ℓ/secとし、水路に堆砂が生じない限界の給砂を行った。水路上流端と下流端の影響を受けないように、水路下流端から2mの地点から上流側1mの区間を測定区間として、流速分布・水深・濃度分布の測定を行った。

3. 実験結果

3. 1 水理条件

流れの構造を対数則(式2)で評価した。なお理論河床は粗度の頭部から粗度径の20%下方とし、カルマン定数 κ と相当粗度 K_s は流速のデータと対数型流速分布式が、 $u/u_* \geq 8.5 (=Bs)$ で一致するように、試行錯誤により求めた。結果は表1に示した。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{K_s} \right) + Bs \quad (2)$$

NO.	勾配 1/n	流量 l/s	水深 h(cm)	給砂濃度 %	K_s cm	h/K_s	κ	摩擦速度 U_* (cm)	NO.	勾配 1/n	流量 l/s	水深 h(cm)	給砂濃度 %	K_s cm	h/K_s	κ	摩擦速度 U_* (cm)
1	50	4.975	2.791	0.313	0.95	2.93	0.38	7.379	18	10.08	4.92	2.07	0.599	1.75	1.18	0.5	14.18
2	50	4.99	2.766	0.591	0.92	3.00	0.34	7.363	19	10.08	4.92	2.082	1.068	1.7	1.22	0.5	14.22
3	50	4.975	2.802	1.057	0.96	2.91	0.3	7.411	20	10.08	4.92	2.068	2.269	1.65	1.25	0.5	14.18
4	50	4.975	2.767	2.245	0.94	2.94	0.27	7.364	21	10.08	19.86	4.298	0.335	2.18	1.97	0.4	20.44
5	50	20.2	6.044	0.329	1.14	5.30	0.38	10.88	22	10.08	19.86	4.298	0.572	2.1	2.04	0.4	20.44
6	50	19.56	5.900	0.580	1.15	5.13	0.36	10.75	23	10.15	20.11	4.218	1.165	1.9	2.22	0.34	20.18
7	50	20	5.859	1.171	1.05	5.58	0.32	10.71	24	10.15	20.11	4.133	2.074	1.65	2.50	0.33	19.97
8	50	20.2	5.78	2.065	0.88	6.56	0.28	10.64	25	50	5.04	2.517	0.996	0.58	4.34	0.23	7.024
9	19.82	4.945	2.417	0.315	1.45	1.66	0.46	10.93	26	50	20.59	5.166	2.090	0.88	5.87	0.22	10.06
10	19.82	4.945	2.352	0.596	1.04	2.26	0.46	10.78	27	19.66	5.006	2.108	4.865	0.8	2.63	0.2	10.25
11	19.82	4.945	2.374	1.063	1.15	2.06	0.4	10.83	28	19.87	19.87	4.754	1.936	1.18	4.02	0.27	15.31
12	19.82	4.945	2.333	2.258	0.98	2.38	0.38	10.74	29	10.08	4.94	1.949	4.925	0.95	2.05	0.28	13.76
13	19.82	20.32	4.97	0.327	1.68	2.95	0.39	15.67	30	10.07	20.07	4.115	2.735	1.17	3.51	0.36	20.01
14	19.82	20.32	4.970	0.559	1.64	3.03	0.39	15.67	31	10.07	4.99	2.020	0.547	1.2	1.68	0.4	14.02
15	19.82	19.8	4.907	1.183	1.58	3.10	0.34	15.57	32	161.2	4.95	3.854	0.416	0.87	4.43	0.31	4.839
16	19.82	19.8	4.867	2.106	1.6	3.04	0.34	15.51	33	161.2	4.95	3.735	1.197	0.9	4.15	0.23	4.764
17	10.08	4.929	2.08	0.316	1.75	1.18	0.52	14.22									

表1. 実験CASEと実験結果

これから、相対水深 h/K_s は急勾配粗面上では1程度からせいぜい5~6程度の値をとることがわかる。またカルマン定数 κ は給砂濃度 C の増加とともに減少する傾向が認められる。

3. 2 浮遊砂拡散の運動量拡散への依存性

(1) 拡散係数 ε_s と運動量拡散係数 ε_m

流速分布と濃度分布のデータから、式(3)と式(4)を用い水深ごとの運動量拡散係数 ε_m と浮遊砂の拡散係数 ε_s を求めた。さらに、濃度分布測定について、実測データをもとに濃度分布曲線をスムージングし、その曲線からも拡散係数を求めた。

$$\varepsilon_m = u_* \left(1 - \frac{y}{h} \right) / \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (3)$$

$$\varepsilon_s = -\omega_s C_s / \frac{dC_s}{dy} \quad (4)$$

(2) β の空間分布

浮遊砂の拡散係数 ε_s と運動量拡散係数 ε_m の相似性を検討するため、式(1)で定義される β の空間分布について、検討を行った。(ただし○はスムージングした ε_s 値と実測値の ε_m 値から、●は実測した ε_s 値と実測の ε_m 値から算出した。)例としてCASE25, CASE2, CASE5を図1に示す。

β の分布形は次の3種類に分類できた。

TYPE I : 全水深にわたって β が一定と見なせるもの。

該当するもの CASE25, 27, 28, 30, 31

TYPE II : $y \gg K_s$ では β が一定だが、 $y = K_s$ に近づくにつれて β の値が大きくなる。

$y < K_s$ では β が負の値をとるもの。該当するもの CASE2, 4, 9, 11, 23, 32

TYPE III : $y=Ks$ 付近では β が大きい、 y が大きくなるにつれて β は小さくなり $y=2Ks$ 付近で極小値をとり、それ以後再び β が大きくなるもの。

該当するもの CASE1, 3, 5~10, 12~16, 21, 26, 29

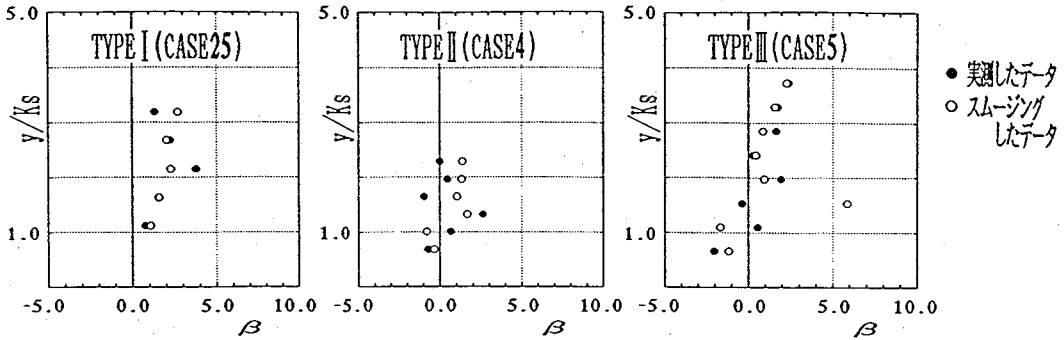


図1. β の空間分布図

以上の3種類の相違を検討した。

① TYPE I とTYPE II

この2つは、 $y \geq Ks$ の領域においては β が一定に見なせるという点が共通している。しかし $y < Ks$ ではTYPE Iは β が正の値をとり、TYPE IIは負の値をとっている。これが両者の違いである。ここで、濃度分布形に注目してみる。TYPE Iは全CASEが、河床で浮遊砂の濃度が最大で y が

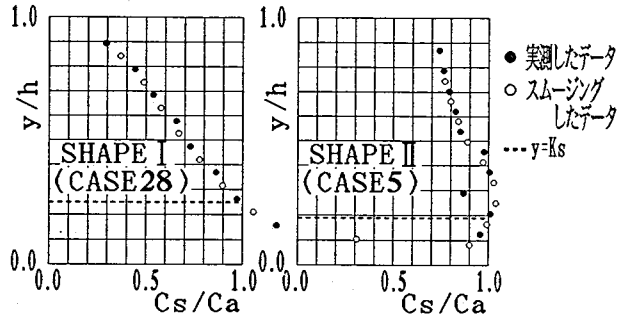


図2. 濃度分布形

大きくなるにつれて濃度が減少していく分布形(以後SHAPE Iとする)を持つ。それに対し、TYPE IIでは全CASEが、河床から y が増加するにつれて浮遊砂濃度が増加し、 $y=Ks$ 付近で極大となりその後濃度が減少してゆく分布形(以後SHAPE IIとする)を持つ。TYPE IとTYPE IIの違いは、 $y < Ks$ の領域で濃度が減少するか、増加するかの違いであるといえる。

② TYPE II とTYPE III

この2つは $y=Ks$ の近傍で β が大きくなる点と、 $y < Ks$ の領域で β の値が負をとっているという共通点を持っている。これは両者の濃度分布形がともにSHAPE IIであるからである。TYPE IIとTYPE IIIの異なる点は、水面に近づくにつれて β が大きくなるか否かである。TYPE IIに比べTYPE IIIは水面に近づいても濃度が減少しない。つまりTYPE IIIはTYPE IIに比べ濃度が水深にわたって一様である。以上より、 β の分布は大きく3つに分類されることがわかった。このことは、浮遊砂の拡散と運動量の拡散が必ずしも同一のプロセスから生じているとはいえないことを示していると思われる。すなわち、濃度分布を運動量拡散(または、流速分布)から導くことが出来ない場合があることを示している。では、この分布形の違いは何に起因するのであろうか。 β の分布型の決定因子を検討するために流量 Q 、摩擦速度 u_* 、給砂濃度 C 、沈降速度 ω 、 ω/u_* 、フルード数 Fr 、レイノルズ数 Re 、基準面濃度 Ca 、 C/Ca それぞれと濃度分布型・ β の分布形との関係を調べた。その結果、 ω/u_* と濃度分布型・ β の分布形との

間に良い相関がみとめられた。図3より $\omega_0/u_* < 0.13$ では濃度分布がSHAPE IIを、 $\omega_0/u_* > 0.15$ では濃度分布がSHAPE Iをとることが読み取れる。また ω_0/u_* が小さくなるとTYPE IIIからTYPE IIへ、そしてTYPE Iへと変化する傾向があることも読み取れる。この濃度分布型を決定する因子 ω_0/u_* は、水への追従性の指標となる無次元量である。 ω_0/u_* が小さいほど水への追従が十分であるといえる。すなわち、水への追従性が高くなると濃度分布はSHAPE IからSHAPE IIへ、 β の分布形はTYPE IからTYPE II、TYPE IIIへと変化するといえる。

3. 2 基準面と流れの構造

従来の研究では、基準点の高さの設定があいまいであった。中川・辻本¹⁾は、粒子のサルテーション運動から浮遊運動への遷移機構を考え、基準点を便宜上、水深の5%としているが、その理論的根拠は乏しい。(しかし、この基準面 $a=0.05h$ を採用している研究が多い)

筆者は、基準面の位置を河床より相当粗度 K_s だけ 図3. ω_0/u_* と β の分布形・濃度分布形の関係上の位置に設定すべきであると考え。その理由を以下に述べる。

まず $y=K_s$ は対数則が成り立つ下限とされており、濃度分布を拡散モデルで検討し、浮遊砂の拡散係数 ϵ_s を渦動粘性係数 ϵ_m から対数則型流速分布をもとに評価する場合、それは $y \geq K_s$ の領域においてなされることになる。従って、浮遊砂の拡散係数 ϵ_s を ϵ_m から推測し濃度分布を求める拡散モデルを使う上で、その領域の下限をすなわち $y=K_s$ の位置を基準点とすることは、妥当である。

次に、本実験より得られた濃度分布には $y < K_s$ の領域で濃度が減少する場合があります(CASE 1~24)、これは拡散モデルでは拡散係数 ϵ_s が $y=K_s$ 付近を境に河床側では負になるということの意味し、物理的に意味を持たない結果となる。拡散モデルを用いて濃度分布の推定を行う以上、拡散モデルで記述できる範囲の境界を基準面とすべきである。

4. まとめ

急勾配粗面上において、浮遊砂の拡散係数 ϵ_s と流体の運動量拡散係数 ϵ_m の比例係数 β は、全水深にわたって常に一定値をとるわけではなく水深によって変化することと、 β の分布形は ω_0/u_* と相関があることがわかった。また、拡散係数及び浮遊砂濃度の空間分布を検討した結果、基準面を河床から相当粗度 K_s だけ上の位置に設定することが妥当であることがわかった。今後、 β の関数形についてさらに検討を行いたい。浮遊砂を含む流れの構造は、 $y \geq K_s$ の領域では対数則流速分布式で評価されるが、 $y < K_s$ の領域での流れの構造は解明されていない。河床の凹凸の大きい山地河川では、 K_s は水深と同程度あるいはそれ以上になることがあるので、 $y < K_s$ の領域での流れの構造についても検討したい。参考文献1) 中川博次・辻本哲明・村上正吾・小藪仁：浮遊砂の基準面濃度の推定について、

第28回水理講演会論文集, 1984, pp. 665~pp. 670.

