

大阪大学工学部 正 員 室田 明
同 正 員 多田博徳
同 大学院 学生員 〇平田健正

1. はじめに；従来提案されてきた種々の掃流砂公式を実験河川に適用するには、河床波の発達に伴い流れと干渉し流砂量に直接関与する河床波上の砂粒運動について定量的な解析が必要である。砂粒運動は河床波と流れの相互干渉および流砂量の算定には不可欠な要素である為、本研究は実験水路において河床波上の砂粒運動を、16mm高速カラー撮影を行い、砂粒移動速度 u_b の分布形を決定し、砂粒運動の特性と河床波との関連について若干の考察を行った。

2. 実験方法；長さ20m、幅50cm、高さ32cmのアクリライト樹脂製可変勾配水路で、 $d_{50}=0.26\text{mm}$ のほぼ均一な砂を用いて実験した。所定の勾配と流量で等流状態にて通水する。波形についてはあらかじめ決めた時間で水を止め水路中央の縦断形状を測定した。流砂量はその間水路下流端にある地砂箱に犯砂したものと計測した。砂粒運動は砂連と遷移領域の平坦河床について高速撮影を行った。砂連の場合は河床波成長に従ってcrest上流背面上を撮影し、着目した河床波の波高、波長、撮影位置を測定した。波高分布中での着目波高の位置はFig.1,2に示す。撮影砂面面積は $1\text{m} \times 1\text{m}$ 、撮影速度は砂連、遷移領域の平坦河床それぞれ毎秒200コマ、400コマ、撮影時間は20秒、10秒である。解析はdynamic flameで映写し、Lagrange的砂粒移動速度 $[u]_L$ 、Euler的砂粒移動速度 $[u]_E$ 、および移動砂粒数 n を求めた。水理条件はTable(1)に、河床形態は砂連、遷移領域の平坦河床をそれぞれr, fで表中に示した。

3. 砂粒運動の特性について

3.1. Lagrange的砂粒移動速度 $[u]_L$ ；映写画面上に基準線を2本（間隔は砂面定長で5mm）設けその間にある砂粒を20コマ（砂連の場合は1/10秒、平坦河床の場合は1/20秒）にわたり砂粒が移動を始めてから2コマ（砂連で1/100秒、平坦河床で1/200秒）にもつ移動距離より移動速度 $[u]_L$ を求めた。 $[u]_L$ の分布はFig.3~5に示す。Fig.3は指数分布することが予想される。指数分布の確率密度関数 $f(x)$ は(1)式で与えられる。

$$f(x) = \frac{1}{x} \cdot e^{-\frac{1}{x}} \quad \text{----- (1)}$$

Table-(1)

Run	河床形態	勾配	流量 (l/cmsec)	時間 (min)	水深 (cm)	径深 (cm)	平均流速 (cm/sec)	F	k (cm/sec)	n	$[u]_E$ (cm/sec)	Q_B (cm/cmsec)	$[n]$ (1/cmsec)
1-1	r	1/500	0.20	7	6.8	6.3	29.4	0.36	2.39	1.14	3.44	0.70×10^3	57
2				120	8.6	8.4	22.7	.25	1.59	1.29	3.96	4.30	89
2-1	r	1/1000	0.25	0	8.0	7.0	31.3	.35	1.29	1.74	2.40		132
2				60	10.0	9.1	25.0	.25	1.87	1.63	3.11	6.87	72
3				120	10.4	9.5	24.0	.24	2.33	1.54	3.64	6.87	399
4				240	10.8	9.9	23.1	.23	3.35	1.50	5.27	6.96	219
3-1	r	1/500	0.25	0	7.6	7.0	32.9	.38	2.80	2.20	6.24		274
2				14	8.2	7.6	30.5	.34	2.81	2.16	6.53	8.90	429
3				40	9.2	8.6	27.2	.29	2.92	1.72	5.29	11.80	282
4				80	9.2	8.6	27.2	.29	2.40	2.41	6.08	12.50	897
4	f	1/250	0.25		5.2	4.8	48.1	.67	3.28	7.50	21.8	483.4	1865
5	f	1/225	0.20		3.9	3.6	51.3	.83	4.02	7.12	26.7	384.0	3094
6	f	1/225	0.25		4.4	4.0	56.8	.87	3.22	8.45	27.0	597.2	3783
7	f	1/200	0.20		3.8	3.5	52.6	.86	2.99	9.62	28.0	526.0	
8	f	1/200	0.25		4.1	3.7	61.0	.96	3.74	9.53	34.2	828.3	6415

今 $x_1, x_2, \dots, x_n$ が(1)式の指数分布に従う互いに独立な変数と考えると, $x_1, x_2, \dots, x_n$ のたたみこみ ($x_1 + x_2 + \dots + x_n$) は(2)式の確率密度関数 $g_n(x)$ をもつ.

$$g_n(x) = \frac{1}{k} \cdot \frac{(x/k)^{n-1}}{(n-1)!} \cdot e^{-\frac{x}{k}} \quad \text{----- (2)}$$

この密度 $g_n(x)$ はガンマ密度を与えるものである. また

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_n = n \cdot k \quad \text{----- (3)} \quad \sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2 = n \cdot k^2 \quad \text{----- (4)}$$

ここで m, σ^2 はそれぞれ実測の分布の平均値と分散である. (3), (4) 式より k と n を求め表中に記した. この k と n を用いた確率密度関数 $g_n(x)$ は Fig. 3~5 に併記した. $g_n(x)$ は実測の分布と非常に良く一致し, 3次モーメントまでである. 河床波の発達に伴い $(U_s)_E$ の指数分布から正規分布への変化はこのたたみこみの効果である. Fig. 6 に Froude 数に対し $1/100$ 秒単位での n をプロットした. n は F 数で整理でき, 発達過程では n は F 数に伴い増加する. Fig. 7 に摩擦速度 u_* に対し k をプロットした. k は u_* に伴い増加し, 河床近傍の流速に影響される.

3.2. Euler 的砂粒移動速度 $(U_s)_E$; 写真画面上に基準線を設け, この線を通る砂粒に着目し画面上端から消えるまでもしくは停止するまで追跡しその間の平均砂流速を $(U_s)_E$ とした. 砂連では河床波の成長に伴う著しい増加はなく, 平坦河床では平均流速のオーダーである. $(U_s)_E$ と u_* の関係は Fig. 8 に示す. 砂連では u_* に伴い増加する. $(U_s)_E$ の分布は Fig. 9, 10 に示した. 砂連では対数正規分布, 平坦河床では正規分布に従う.

3.3. 移動砂粒数 n ; 写真画面上に 3mm の間隔で基準線を二本設けそれぞれの基準線を通る砂粒数を砂連で 7 秒平坦河床で 3 秒にわたり判定した. 表中にはその平均値を示す. 砂連では成長に伴い one order の増加があり, 1~5 秒の不規則な周期をもって移動するが, 平坦河床ではほぼ一様に移動する.

4. 波形の効果; 砂連の成長において $(U_s)_E$ の増加よりも n の増加率の方がはるかに大きく, 砂連の成長は河床近傍の流速分布の乱れによるところが大きい. Fig. 11 は H/H_0 と n/q_B の関係を示した. H は着目波高, H_0 は波高分布中の 50% の波高, q_B は流砂量である. これより n/q_B は着目波高の分布中の位置で表現でき, H/H_0 とともに増加する.

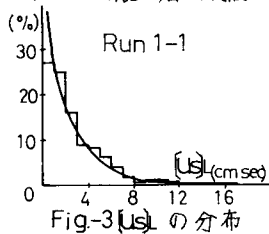


Fig-3 (U_s) の分布

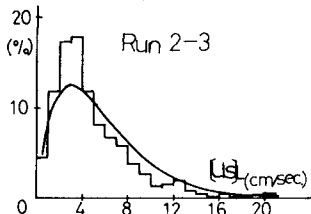


Fig-4 (U_s) の分布

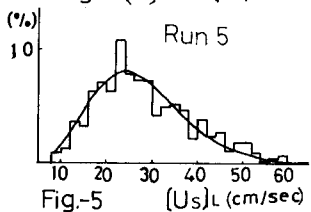


Fig-5 $(U_s)_L$ (cm/sec)

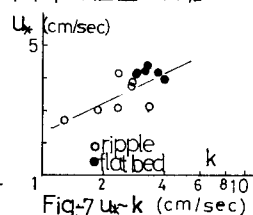


Fig-7 $u_k \sim k$ (cm/sec)

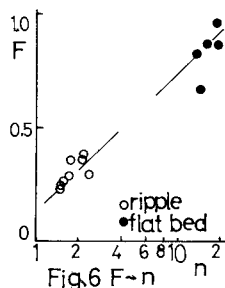


Fig-6 $F \sim n$

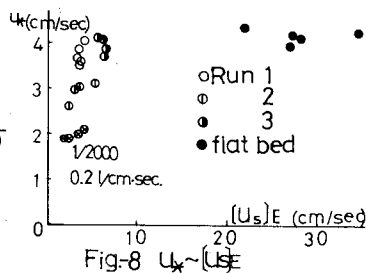


Fig-8 $u_k \sim (U_s)_E$

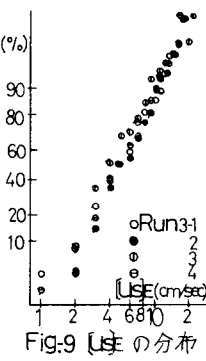


Fig-9 (U_s) の分布

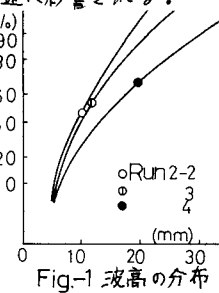


Fig-1 波高の分布

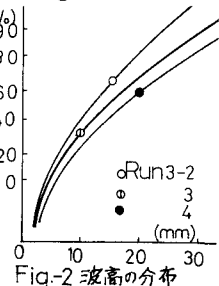


Fig-2 波高の分布

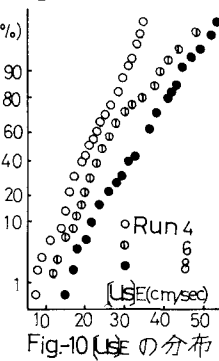


Fig-10 $(U_s)_E$ の分布

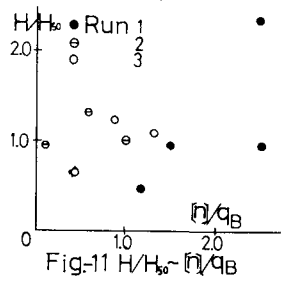


Fig-11 $H/H_0 \sim n/q_B$