

東京工業大学研究生 学生会員 金 舜範

東京工業大学工学部 正会員 福岡 捷二

東京工業大学大学院 学生会員 山坂 昌成

1. はじめに 河床変動や流路変動は流砂量が場所的に変化し、流砂が非平衡状態で流れることによって生じる。著者ら^{2,3)}は、物理的な考察により掃流力や河床の縦・横断勾配が場所的に変化する場合や境界条件が流砂運動を支配する領域における流砂の非平衡性を検討して来た。その結果、その地点の掃流力、縦・横断勾配によって一義的に決定される平衡流砂量と問題としている地点の非平衡流砂量との関係式を得た(式(2))。しかし、この関係式には比例定数 K_B が含まれている。この定数がどのような物理量により支配されているのかを明らかにしない限り非平衡流砂量と平衡流砂量を関係づけた式の有用性が低い。しかし、比例定数を理論的に算定することは困難なため、本研究では工夫をこらした実験により非平衡性のパラメータの算定を試みる。

2. 実験装置および実験方法 一樣に砂を敷きならした水路に、上流端で給砂を行わずに通水すると上流域の河床が低下する。これは、流砂運動の非平衡性のために生じる現象である。本研究ではこの河床低下量を測定することにより、非平衡性のパラメータを算定する。上流域の洗掘量を精度よく読み取るためには、長時間の実験が必要である。しかし、洗掘量が大きくなるほど、水理条件が初期に設定したものと大きく変化するため、流砂運動は非平衡でかつ非定常となる。非定常の影響を除くため次のような実験方法をとった。図-1に示す長さ5mの可変勾配水路の一部に砂を敷きならし通水する。上流端にポイントゲージを設置し、河床低下によってポイントゲージの先端が常に水面と同じ高さにあるように、ジャッキにより、上流域の洗掘量に見合う量だけ水路を上昇させる。これにより河床勾配、水理条件は実験期間中ほぼ一定に保たれ、流れおよび流砂量の非定常性はとり除かれ、かつ流れはほぼ等流となる。各点の洗掘量は、水路側方より一定時間ごとに写真撮影した35mmフィルムを解析することにより求めた。下流端では一定時間ごとに流砂量の測定を行った。実験に用いた砂は粒径0.055, 0.07, 0.13, 0.175mmの4種類で、比重はすべて2.65~2.70の範囲にある。

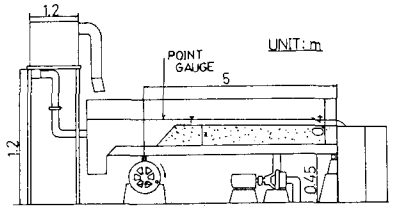


図-1 実験装置

図-2に示す長さ5mの可変勾配水路の一部に砂を敷きならし通水する。上流端にポイントゲージを設置し、河床低下によってポイントゲージの先端が常に水面と同じ高さにあるように、ジャッキにより、上流域の洗掘量に見合う量だけ水路を上昇させる。これにより河床勾配、水理条件は実験期間中ほぼ一定に保たれ、流れおよび流砂量の非定常性はとり除かれ、かつ流れはほぼ等流となる。各点の洗掘量は、水路側方より一定時間ごとに写真撮影した35mmフィルムを解析することにより求めた。下流端では一定時間ごとに流砂量の測定を行った。実験に用いた砂は粒径0.055, 0.07, 0.13, 0.175mmの4種類で、比重はすべて2.65~2.70の範囲にある。

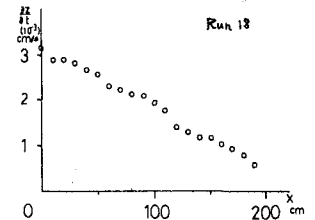


図-2 単位時間あたりの河床洗掘量

3. 実験結果および非平衡パラメータの算定法 河床の洗掘速度の一例を図-2に示す。上流域ほど洗掘量が大きく、下流するに従って洗掘量は小さくなる。すなわち、上流部では、河床に作用するせん断力により、静止していた河床の砂粒子が移動しはじめ、砂が下流に流送されるのに対して、上流からはそれに見合うだけの流砂の供給がないために、上流域では河床が大きく洗掘されている。このように、流れが等流状態を保っている場合においても境界条件の影響により流砂運動の非平衡性が現れる。各地点での流砂量を直接測定することは困難であるため、上流端で流砂量がゼロの条件で流砂の連続式(1)を流下方向に積分することにより各位置での非平衡流砂量を算定した。(1)式を上流端から下流端まで積分すると下流端の流砂量が得られ、実測の流砂量と大きく異なる場合のデータは削除した。この方法により求めた図-2に対応する流砂量の流下方向変化を図-3に示す。流砂量は上

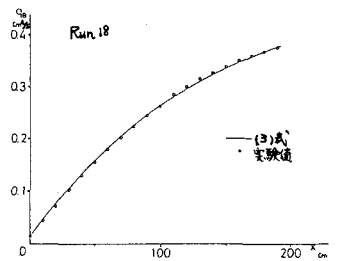


図-3 流砂量の流下方向変化

$$(1-\lambda) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad \text{----- (1)}$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} = K_B (Q_{se} - Q_s) \quad \text{----- (2)}$$

$$Q_s(x) = Q_s(0) + (Q_{se} - Q_s(0))(1 - e^{-K_B x}) \quad \text{(3)}$$

流部ほど小さく、流下する間に増加しながらある値に漸近している。この漸近値が平衡流砂量であり、十分下流では流砂の出入は平衡して、河床の洗掘も堆積も生じない。図-2と図-3を比較すると、平衡流砂量と実際に流れている流砂量の差が大きい上流域ほど河床の洗掘量が大きく、この差が小さい下流域ほど洗掘量が小さくなっており、河床の洗掘速度が平衡流砂量と実際に流れる非平衡流砂量の差に比例するという著者らの仮定をほぼ満足している。この比例定数を K_B とし、流砂の連続式を考慮すると、著者らの提案した平衡と非平衡の流砂量の関係式が得られる。本実験では、流水がほぼ等流とみなせるため、 $g_{be} = \text{const}$ として(2)式を g_B について解くと、(3)式が得られる。砂を敷きならした最上流端では流れの急縮の影響があり、水理条件が下流部のものと異なるため、 $x=0$ は、最上流端よりやや下流のほぼ等流が成り立っているとみなせる地点に選んだ。(3)式により表現される流砂量の変化の一例を図-3中に実線で示した。実験的に得られた流砂量の流下方向変化と(3)式との対応は良好で、

これらの実験結果により非平衡性のパラメータ K_B を算定することが可能である。 K_B は、図-3のように実験的に得られた各地点の流砂量と(3)式との誤差が最小となるようにして求めた。実験条件と、得られた K_B の一覧を表-1に示す。

4. K_B の定式化と結果の考察 実験的に得られた非平衡性のパラメータを水理量と関連づけることを試みる。砂粒子の運動はその粒子に作用する外力が正確に表現されれば決定論的に決まり、非平衡性のパラメータも水理条件などにより一義的に決定されるはずである。しかし、ある砂粒子に着目した外力の正確な評価は現段階では不可能であるため、次元解析手法を用いて非平衡性のパラメータと他の物理量の関係を見出す。 K_B と他の物理量との間には(4)式の関係式が成り立つ。式中の M_s および M_k はそれぞれ砂の静止摩擦係数および動摩擦係数である。基本物理量に d, ρ, g を選び無次元化すると(5)式の関係式が成り立つ。 $M_s, M_k, \beta/p$ は本実験条件の範囲ではほとんど変わらない。また、勾配 i の効果を取り切れていないものは砂粒子重量の斜面方向成分であり、 i が小さいときこの影響は小さいため、近似的に(6)式が成り立つ。この3つの無次元量を実験結果を用いて整理するとほぼ(7)式の関係が成り立つ。図-4に、(7)式と実験結果との対応を示す。(7)式中の τ_* は砂粒子に作用するせん断力と重量の比、すなわち、静止状態からの移動しやすさを示す無次元量であり、 $\rho v^2 / [(\rho_s - \rho)gd^3]$ は砂粒子に作用する粘性力と重力の比、すなわち、一旦河床から飛び上がった砂の河床への戻りやすさを示す無次元量である。流砂の非平衡性のパラメータがこれらの量で表現されることは K_B の物理的解釈を容易にする。すなわち、(7)式は河床から砂が飛び上がりやすく、河床にもどりにくいほど $K_B d$ は小さくなり、流砂の非平衡性が強く現れることを示す。本研究では、限られた量のデータを用いて次元解析を行なったため、非平衡性のパラメータ K_B に及ぼす $M_s, M_k, \beta/p, i$ に關するものは(7)式の定数に含まれていて、これらの影響が評価できていない。広い範囲に変化する実験条件でデータが得られれば(7)式を基本にして、さらに精度の良い実験式が得られると考えられる。

RUN No.	d50 (cm)	h (cm)	I(10 ³)	I(10 ³)	RUN No.	d50 (cm)	h (cm)	I(10 ³)	I(10 ³)
1	0.055	354	788	0.056	18	0.13	315	108	0.53
2	-	226	831	0.087	19	-	321	122	0.84
3	0.07	171	059	1.8	20	-	308	195	0.86
4	-	175	058	1.3	21	-	316	165	0.86
5	-	173	055	2.1	22	-	317	123	0.54
6	-	175	059	1.1	23	-	311	135	0.78
7	-	177	055	1.1	24	-	319	132	0.77
8	-	272	097	1.5	25	-	253	116	0.57
9	-	280	095	0.96	26	-	240	116	0.50
10	-	312	076	0.59	27	-	247	108	0.63
11	-	304	078	0.54	28	-	245	125	0.45
12	-	298	078	0.74	29	-	236	117	0.71
13	-	192	070	0.77	30	-	244	107	0.77
14	-	191	058	0.70	31	0.175	272	534	0.36
15	-	070	059	24	32	-	392	534	0.14
16	-	070	067	16	33	-	238	772	0.30
17	-	070	068	2.5	34	-	362	853	0.11

表-1 実験条件及び実験結果

$$F_1(K_B, d, M_s, M_k, \rho_s, \rho, \nu, g, h, i) = 0 \quad (4)$$

$$F_2(K_B d, M_s, M_k, \frac{\rho g h i}{(\rho_s - \rho) g d}, \frac{\rho}{\rho_s}, i, \frac{\rho v^2}{(\rho_s - \rho) g d^3}) = 0 \quad (5)$$

$$F_3(K_B d, \frac{\rho g h i}{(\rho_s - \rho) g d}, \frac{\rho v^2}{(\rho_s - \rho) g d^3}) = 0 \quad (6)$$

$$K_B d = 5 \times 10^{-6} \left(\frac{\rho v^2}{(\rho_s - \rho) g d^3} \right)^{-1} \tau_* \quad (7)$$

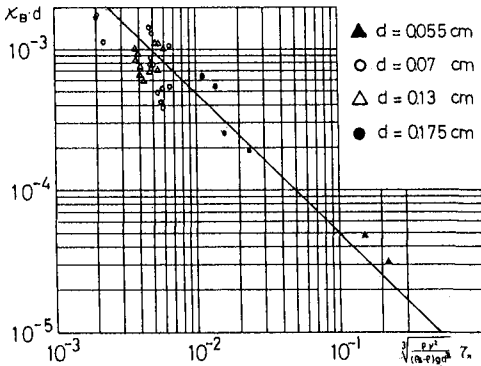


図-4

参考文献 1) 山坂・福岡, 第35回年講
2) 福岡・山坂, 第37回水講