

非平衡状態にある浮遊砂の流送機構に関する実験的考察

徳島大学 正員 岡部 健士
同 正員 杉尾 捨三郎

1. 概説 : 非平衡状態にある浮遊砂濃度をEuler的拡散方程式と2個の境界条件式(路床条件式および水面条件式)により解析する場合、拡散係数の評価法と路床条件の設定法が重要なポイントになる。従来より、前者としては、等流中の平衡状態にある浮遊砂に対する表示式を準用することが慣例化している。Apmann & Rumer¹⁾, Jobson & Sayer²⁾, Yalin & Finlayson³⁾らの実験結果を参照すれば、それが基本的には妥当であることがわかるが、実験方法には若干の問題があるので確証とはならない。また、表示式の定量性についての問題は今なお残されている。一方、後者の路床条件に関しては、研究者によって基本概念すらまちまちである。これまで、(a) 路床近傍の基準高さ $z=z_R$ における濃度 C_R を流れの特性量とみなす考え方^{1), 3)}, (b) z_R における濃度勾配 $\frac{\partial C}{\partial z}|_{z_R}$ によって規定される砂粒のflux $(= \epsilon^{\frac{3}{2}} \frac{\partial C}{\partial z}|_{z_R})$ を流れの特性量とみなすもの⁴⁾, および(c) z_R における砂粒のfluxが非平衡性の影響を受けるとするもの⁵⁾, という3種の異なった概念が提示されている。しかし、いずれによるのが最も適切であるかについての議論は、その資料となる実測例が少ないこともあって、十分であるとは言えないのが現状である。

昨年度の年講において、著者は河床波上の等流における非平衡浮遊砂の路床条件に関する実験的検討の結果を報告し、(c)に類する考え方を採るべきことを主張した。その後、拡散係数についても検討を進めた結果、図-1に示されているように、非平衡領域の拡散係数と平衡領域のそれとはほぼ一致することが確かめられた。

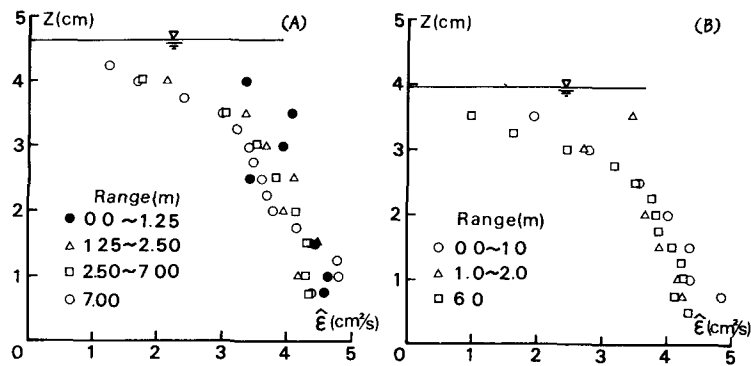


図-1 河床波が存在する場合の拡散係数, (A)発達過程, (B)減衰過程

本報告では、河床波が発生していない路床上の等流において、浮遊砂の濃度分布が発達あるいは減衰して平衡状態のものへと遷移してゆく過程を観測した実験の結果を紹介する。さらに、実測資料に基づいて行なった、上述のような基本的諸問題に関する実験的考察の結果を要約して報告する。

2. 実験方法ならびに観測結果 : 実験は、幅0.3m、長さ20mの定勾配水路($b=0.00308$)を用いて行なわれた。水路の下流側約15mの区間に、直径12mmのガラス球と10~20mmの川砂利を約4:1の割合で混合したものを一層に敷き詰め、これを丁度覆い隠す程度の厚さに代表粒径0.16mm(代表沈降速度 $w_p \approx 2.0$ cm/s)の均一性の高いシリカサンドを水中散布して、移動床モデルを作った。このモデルに給砂を行なうこほなく定常流量の通水を行なって濃度分布の発達過程を得、流れの流送能力の2倍程度の給砂を行ないつつ通水して減衰過程を作り出した。濃度測定用の採水は、0.5m間隔の断面ごとに、開口部が20mm×2mm、中心間隔が4mmの10連サイフォンを用いて行なわれた。このとき、採水速度は断面平均流速を基準にして調節した。

表-1 実験された流れの代表的物理量の一覧表

Run No.	流量 (ℓ/s)	水深 (cm)	平均流速 (cm/s)	摩擦速度 (cm/s)	F_r	k_s (cm)	w_s (cm/s)	condition of process
1	5.03	4.40	38.11	3.64	0.58	0.74	2.0	increasing
2	4.50	4.10	36.59	3.52	0.58	0.71	2.0	decreasing

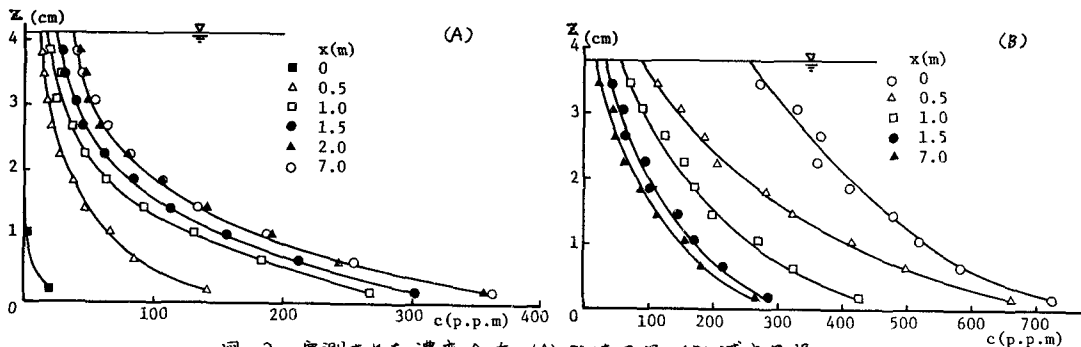


図-2 実測された濃度分布 (A) 発達過程, (B) 減衰過程

実験は、発達過程および減衰過程についてそれぞれ1 caseづつ実施された。各流れがもつ代表的な水理諸量を表-1にまとめて示している。ここに、 Fr :フルード数, R_s :相当砂粒粒度である。

実験によって得られた濃度分布の変化過程を図-2に示している。本図において、濃度は重量割合で表示され、高さは、球および砂利の平均頂面位より3mm下方に置いた水深基面に基づくものである。なお、記入された曲線は描点群の示す傾向をHand Smoothingしたもので、考察に用いる諸量の算定はこれにより行われている。

3. 考察: (1)拡散係数について。2次元等流中の浮遊濃度は近似に $u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(E \frac{\partial C}{\partial z} \right) + w_s \frac{\partial C}{\partial z}$ (1) のように表わされる。ここに、 u :流速, E :拡散係数, C :濃度, x および z :それぞれ流れ方向および深さ方向の座標。水面条件を考慮しつつ(1)式を $z \sim R$ (水深)の向で積分すると $\frac{d}{dx} \int_z^R C u dz = -E \frac{\partial C}{\partial z} - w_s C$ (2) となる。これを、 Δx だけ離れた2断面1, 2について離散化すると $\frac{\Delta}{\Delta x} \left[\int_z^R C u dz \right]_1^2 = -E \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_1 + \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_2 / 2 - w_s (C_1 + C_2) / 2$ (3) となって、(3)式を利用すれば2断面間の領域の代表的拡散係数 $\hat{E}$ を実験資料より算定することができる。

u を断面則で評価した場合の $\hat{E}$ を描いたのが図-3である。本図より、拡散係数は非平衡性には関係なく、流れの特性量として取り扱えることがわかる。

(2)路床条件について。図-2より、概説で述べた(4)の考え方は不合理であることがわかる。つぎに(b)と(c)について考えてみる。 $z = R_s$ とし、(3)式の z を R_s とすると

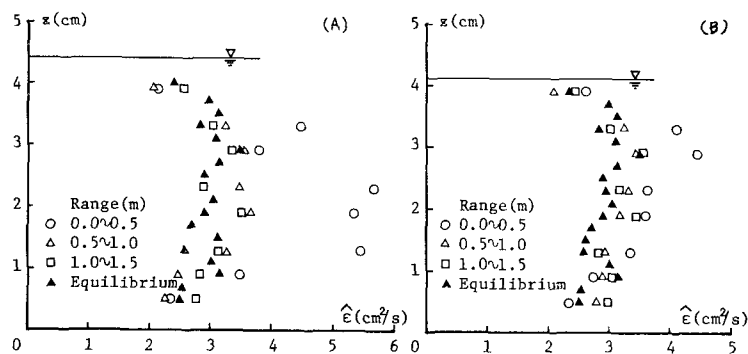


図-3 $\hat{E}$ の算定値の分布 (A) 発達過程 (B) 減衰過程

次式より $z = R_s$ の面を通る砂粒fluxの概略値 $\hat{q}_{sf}$ が求まる。 $\frac{\Delta}{\Delta x} \left[\int_{R_s}^R C u dz \right]_1^2 = \hat{q}_{sf} - w_s [C_1 + C_2] / 2 \Big|_{z=R_s}$ (4) 従来、(b)の考え方では $\hat{q}_{sf} = w_s C_{er}$ (C_{er} :平衡状態における基準点濃度)とおかれる。この点を検討したのが表-2である。表中の数値は比 $\{ w_s C_{er} - w_s [C_1 + C_2] / 2 \Big|_{z=R_s} \} / \frac{\Delta}{\Delta x} \left[\int_{R_s}^R C u dz \right]_1^2$ であり、 $\hat{q}_{sf} = w_s C_{er}$ のとき1となる。これより、 $z = z_R$ の面を通る砂粒fluxを w_s と C_{er} の積で評価することとは不適当であると言える。今後の問題は、路床条件に関する新たなモデルを模索することにあるが、これについては講演時に述べるつもりである。

表-2 $\hat{q}_{sf} = w_s C_{er}$ の検討

Run	Range (m)	0~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5
1		5.45	5.00	1.28
2		2.50	2.57	1.50

最後に、本研究は昭和55年度文部省科研費の援助を受けたものであることを記して、関係各位に謝意を表す。

- 1) Apthorn & Rumer: Diffusion of Sediment in Developing Flow, ASCE, HY1, 2) Jobson & Sayer: Vertical Transfer in Open Channel Flow, ASCE, HY3, 1970. 3) Yalin & Finlayson: On the Development of the Distribution of Suspended Load, IAHR, 1973. 4) 芦田和男: 浮遊砂, 1974年度夏期研修会, A-4. 5) 合田健: 上水浄化における水理学上の基礎的諸問題, 京大工学部論, 1956. 6) 杉尾 岡部: 河床流上の流れにおける非平衡浮遊砂の流送について, 年報, 1990