

混合粒径砂の横断方向浮遊拡散による分級

北海道大学工学部 学生員 水 子 龍彦
同 上 学生員 石 川 伸
同 上 正 員 長谷川 和義

1. はじめに：著者ら¹⁾は、細砂・シルト河川の平衡断面の形成過程にかかわる諸問題を、浮遊砂横断拡散に着目して解析してきた。その結果、浮遊砂の側岸付着は常に生じるわけではなく、摩擦速度／沈降速度の比がある程度以上大きい場合にそれが生起して、側岸斜面上掃流砂と動的に平衡することが明らかにされた。しかし、これは単一粒径に関する結論である。本研究は、混合粒径砂の浮遊特性、特に分級作用に着目した横断方向拡散の性質を調べたものであり、そこで得られた知見を既知の機構に組み込むことをねらっている²⁾。

2. 浮遊砂濃度分布と巻き上げ量式：図1は使用断面及び記号の定義である。この水路を用いてあらかじめ砂を敷設して約30分間通水後、十分平衡状態に達したことを確認してから注意深く採水を行った。採取した砂を濾過・乾燥の後JIS標準網ふるいでふるい分けを行い、 $d=0.0180(\text{cm})$, $0.0090(\text{cm})$, $0.0037(\text{cm})$ の3種類の粒径別浮遊砂濃度を求めた。その測定結果を図2に示す。側岸斜面に沿う活発な浮遊拡散が見てとれる。紙面の都合上図は省略するが、粒径別の鉛直濃度分布は指数分布に対してもRouse分布に対しても同程度によく一致する。指数分布のプロット図から粒径別に拡散係数を求めると、吉川・石川³⁾による底面の存在を考慮したみかけの拡散係数にはほぼ一致する。図3

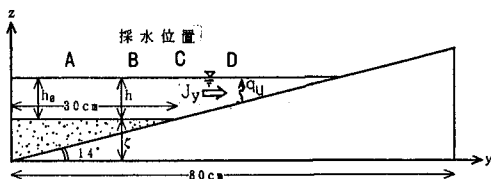


図1 使用断面及び記号の定義

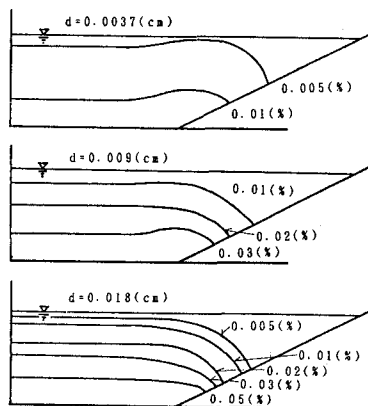


図2 粒径別濃度測定結果(RUN SM-4)

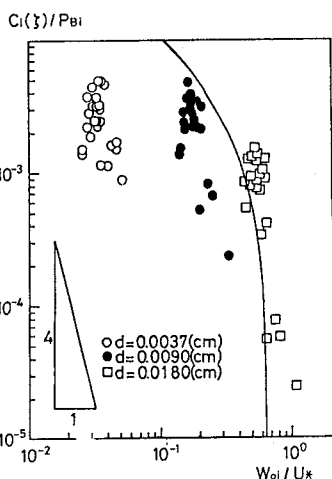


図3 単一粒径換算濃度についての板倉式と実測値の関係

は $C_i(z)/P_{Bi}$ と W_{0i}/U_* 。 (ただし、 $C_i(z)$ ：粒径別濃度分布、 P_{Bi} ：河床砂の粒径別体積割合、 W_{0i} ：粒径別沈降速度、 U_* ：摩擦速度) の関係を示している。図中の実線は代表粒径(中央粒径)を使用した板倉式である。同式において代表粒径を変えてもあまり曲線形状は変わらず、浮遊限界がやや移動する程度である。図3中のデータ群に着目すると粒径ごとにほぼ-4乗の傾きを持つので、式(1)の様に表すことができる。この結果は後で利用する (α ：係数、 h ：水深)。

$$C_i(z) = \alpha \left(\frac{W_{0i}}{U_*} \right)^{-4} P_{Bi} = \alpha \left(\frac{gI}{W_{0i}^2} \right)^2 \cdot h^2 \cdot P_{Bi} \quad (1)$$

疑似的に定常状態を仮定し、流下方向に平衡が達せられているものとする濃度方程式は粒径別に式(2) のようになり、これを河床から水面まで積分し整理すると式(3), (4) を得る。

$$\varepsilon_y \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + \varepsilon_z \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} + W_{0i} \frac{\partial C_i}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial J_{yi}}{\partial y} = q_{ui} - w_{oi} \cdot C_i(\xi) \quad (3)$$

$$J_{yi} = -\varepsilon_y \left\{ \int_{\xi}^{\xi+h} C_i dz + C_i(\xi) \frac{\partial \xi}{\partial y} \right\} \quad (4)$$

ただし、 q_{ui} は粒径 d_i の砂の巻き上げ量式、 J_{yi} は横断方向の水深全体にわたる拡散フラックスを意味し、その y 微分の正負が浸食（正）や堆積（負）を表している。次に実験的に認められる式(1)を採用し、式(4)へ代入して中央水深での水量にて無次元化すると式(5)、(6)を得る。横断フラックスが生じない平衡状態は

$J_{y,i}=0$ において達成され、 $\varepsilon_z = \beta' u_* h / 13$ のように表現できるときには式(7)を得る。 β' は吉川・石川による修正係数である。左辺>右辺の時に堆積、逆の場合に浸食が起こる。

$$J_{y,i} = h_* \left\{ (h_* - \beta_{*i}) \cdot P_{Bi} \frac{dh_*}{dy_*} - \frac{1}{2} \beta_{*i} \cdot h_* \frac{dP_{Bi}}{dy} \right\} \quad (5)$$

$$\beta_{*i} = \frac{2 \varepsilon_z}{w_{oi} h_0} \quad (6) \quad \frac{u_*}{w_{oi}} = \frac{13/\beta'_i}{\frac{2}{h_*} + \frac{1}{P_{Bi}} \frac{dP_{Bi}}{dh_*}} \quad (7)$$

図4は粒径別に傾斜壁上の河床砂データを用いて式(7)の両辺を計算し、プロットしたものである。データ群はやや堆積ぎみを示しているものの45°線付近に集まり、近似的に $J_{yi}=0$ とみなし得る。この解析により、混合粒径砂の河床構成比 P_{Bi} が浮遊砂底面濃度・断面形状とともに平衡フラックスに対する一つの調整手段となり得ることがわかる。 $U_* = U_{*0}$ とみなして式(7)から P_{Bi} を解くと式(8)となる（ただし、 $y_* = (y-30)/h_0$ 、 P_{Bi} は河床砂の粒度構成比）。

$$P_{Bi} = \frac{P_{Bi0}}{(1 - \tan \theta \cdot y_*)^2} \cdot \exp \left\{ -\tan \theta \cdot \frac{13 w_{oi}}{\beta'_i u_*} y_* \right\} \quad (8)$$

図5は、式(8)の計算結果を実線で示し、傾斜壁上の河床砂データをプロットして粒径別に比較したものであり、理論線は実験値の傾向をほぼ表現している。これらの結果は興味深い。大粒径砂は、 w_{oi} が大きいため、 U_* がかなり大きくない限り岸から中央へ向かうフラックスが生じる（河岸浸食が起こる）のが一般的であり、これを止めるために側岸上 P_{Bi} の減少が起こっている。これに対し、小粒径砂は w_{oi} が小さく中央から岸に向かうフラックスが生じる（堆積が起こる）ので、これを抑えるために側岸 P_{Bi} の増加が発生している。すなわち、側岸細粒化の分級過程によって平衡横断面形が維持されている。

4. おわりに：混合粒径浮遊砂を用いた場合、浮遊形式で進行する浸食・堆積は河床構成砂の粒度割合 P_{Bi} に大きく左右される。一樣粒径砂では平衡に達するための調節手段は浮遊砂底面濃度と断面形状のみであるが、自然河川では河床構成比 P_{Bi} も、調節手段となっていることが推察される。これら全てを未知数とした動的平衡の解を求めることが今後の課題である。

参考文献：1)長谷川・望月(1988)：浸食・堆積過程にある流路の浮遊砂底面濃度について、第32回水理講演会論文集 2)長谷川・水子・石川(1989)：分級効果を考慮した鉛直及び横方向浮遊砂拡散に関する研究、土木学会北海道支部、論文報告集、II-14など 3)吉川・石川(1978)：流砂運動のモデル化とそれに基づく流砂量の算定法について、土木学会論文報告集、第269号、1-118

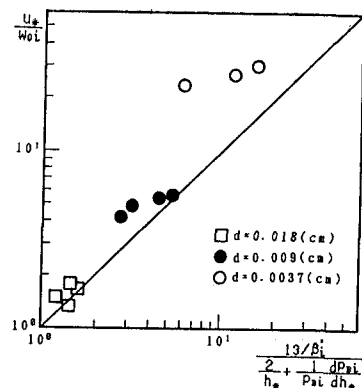


図4 傾斜壁面上の浮遊砂横断フラックスの動向

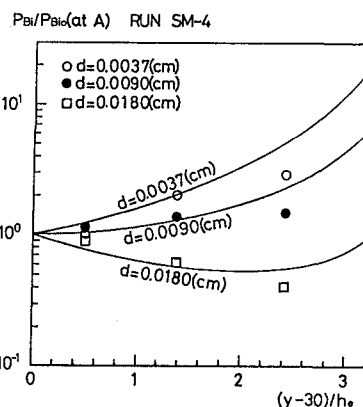


図5 傾斜壁面上で平衡状態($J_{y,i}=0$)での理論値と実験値の比較