

縦断分級河床（グラベルシート）上の流れと流砂量変動

金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎

金沢大学大学院 学生員 本橋 健

金沢大学工学部 ○井上 慎一

1. まえがき： 河床が細砂と粗砂で構成されている場合、表層粒度の粗い部分、細かい部分が縦断方向に交互に繰り返す、それが進行する分級がしばしば観察される。著者らはすでに、河床粒度構成に対する線形不安定性解析を行ない、限界掃流力付近の流れで、細砂の粒径の 500~1000 倍程度を卓越波長とする交互分級が形成されるという結果を得た。¹⁾ このような河床上では縦断方向に流砂量が変動するため、河川形態学的な興味だけでなく工学的重要性もあることに鑑み、本研究では、交互縦断分級が形成された場での流れ構造と流砂量変動について検討した。

2. 交互縦断分級河床上での流れ構造： 底面せん断応力が急変するとき、Reynolds 応力の応答は高さ方向に異なる遅れ距離をもつ。Reynolds 応力は底面付近では瞬間的に応答し、 $\eta = y/h$ が大きくなるに従って応答が遅れる。ここでは比較的精度のよいと思われる Jacobs²⁾ の実験データを用いて、Reynolds 応力の緩和について検討し、その impulse response として、次式のような指数型のものを採用した。

$g_R(\xi | \eta) = \{1/\Lambda_R(\eta)\} \exp[-\xi/\Lambda_R(\eta)]$ ……(1) ここで、 $\Lambda_R = \lambda \eta$ ：無次元緩和距離、 $\xi = x/h$ であり、Jacobs のデータについて各高さでの緩和距離を調べた結果より、 $\lambda = 30$ とした。上式の impulse response を用いると、Reynolds 応力の空間分布は、 $\tau(\xi, \eta) = (1-\eta) \int_0^{\xi-\xi_0} \tau_0(\xi-\xi') g_R(\xi' | \eta) d\xi'$

……(2) で与えられ、 ξ_0 は粗度急変位置である。この結果は図-1 に実線で示されているが、Jacobs 自身による近似（点線）と同程度の精度である。今、交互縦断分級河床での底面せん断応力の変化を $\tau_0(x) = \tau_{00} [1 + a \sin \kappa x]$ ； $\kappa = 2\pi/L$ ； L ：波長 ……(3) のように与えると、各点での Reynolds 応力は次式によって計算される（この積分は解析的に与える）。

$\tau(\xi, \eta) = (1-\eta) \{ \tau_{00}/\Lambda_R(\eta) \} \int_0^{\xi-\xi_0} [1 + a \sin \kappa(\xi-\xi')] \exp[-\xi'/\Lambda_R(\eta)] d\xi'$ ……(4)

これを図-2 に示した。ただし、 $\kappa_0 = 0.5$ は相対水深 $h/d \approx 50$ に対する無次元卓越波数に相当する。混合距離論を用いて（混合距離 $l = \kappa_0 y \sqrt{1-\eta}$ ， κ_0 ：カルマン定数），流速分布の縦断方向変化を求め、図-3 に示した。流速分布は粗砂の最も多い所で瘦せ、最も少ない所で膨らむこと、平均摩擦速度 u_{*0} を用いた無次元表示より、流速分布の本質的な変化は底面付近に限られることが明らかにされた。次に、乱れ強度の挙動を通常の乱れの u' 、 v' と同じ相関構造を持つとし、正弦波近似した場合の u' 、 v' の位相差 ϕ の高さ方向の変化が普遍であると考えて図-2 の Reynolds 応力より乱れ強度分布を求めた（図-4-a、b）。これより、河床の粗な部分で u' 、 v' の局所せん断応力への貢献は小さいものの（図-4-a），絶対値は大きいこと（図-4-b）がわかる。

3. 交互縦断分級河床上での流砂量変動： 河床表層における粗砂の体積割合を p とし、これが次のように縦断方向に正弦波状に変化すると仮定する。 $p = p_0 [1 + a \sin \kappa x]$ ……(5) 細砂，

粗砂の粒径をそれぞれ d ， βd とすると、平均粒径は、 $d_m = [p(\beta - 1) + 1] d$ ……(6) となる。

また、粒径別 pick-up rate は、中川・辻本の推定式より、次式で表わされる。

$p_{0i}/p_{0ie} = [(\eta_m - k_2)^m \eta_m^{1-m}] / [(\eta_{m0} - k_2)^m \eta_{m0}^{1-m}]$ ……(7)

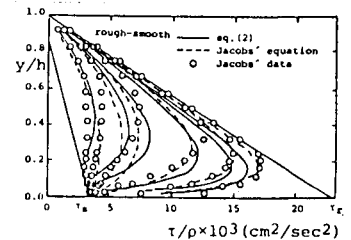


図-1-a Reynolds 応力分布 (rough→smooth)

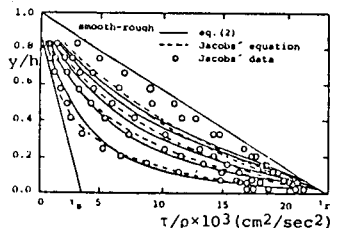


図-1-b Reynolds 応力分布 (smooth→rough)

ここで、 $\eta \equiv \tau/\tau_{*0}$ 、添字mは平均粒径に対する値、0は非擾乱値を表す。掃流力の評価についてはManning-Strickler式を用いて式(8)で、粒径別無次元限界掃流力 τ_{*ci} については式(9)で評価した。

$$\eta_m/\eta_{m0} = (1 + \Psi d_m)^{-2/3}; \quad \Psi d_m = (d_m - d_{m0})/d_{m0} \quad \dots (8)$$

$$\tau_{*ci}/\tau_{*cm} = (d_i/d_m)^{-1} \quad \dots (9)$$

pick-up rate式と掃流力評価式に非線形性が含まれているので、 p_{si} を直接計算し、式(10)の非平衡流砂量式を数値積分することによって流砂量分布を求めた。

$$q_{Bi} = (A_3 d/A_2) \int_0^\infty p_i(x-\xi) p_{si}(x-\xi) \int_\xi^\infty f_{xi}(\xi) d\xi d\xi; \\ f_{xi}(\xi) = 1/\Lambda_i \exp(-\xi/\Lambda_i) \quad \dots (10)$$

ここに、 $f_{xi}(\xi)$: step lengthの確率密度関数、 A_2, A_3 : 砂の形状係数、 Λ_i : 粒径別平均step lengthである。一方、線形解析では表層粒度、pick-up rate、流砂量の振幅倍率と位相差を解析的に簡単に求めることができる。図-5-a, bは、線形、非線形の各手法による同じ条件における計算結果を示したもので、 $p_s, q_{B2}, q_{BT}, q_{B1}$ の順に位相の場所的遅れが認められる。図-6は、粒径別流砂量の実測値³⁾と非線形計算の結果とを比較したもので、位相に関して良好な一致が見られる。ただし、非線形計算の場合の p_{se}, q_{B0} は、補正された実質的な平均値である。

4. あとがき: 線形不安定解析によって、交互縦断分級の形成条件は求められるが、平衡状態の推定には至っていない。今後は本研究で得られた知見をその手助けとしたい。

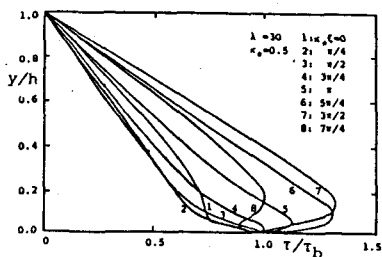


図-2-a Reynolds応力分布 (τ/τ_s)

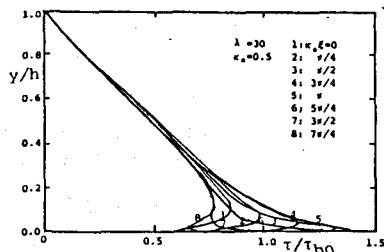


図-2-b Reynolds応力分布 (τ/τ_{se})

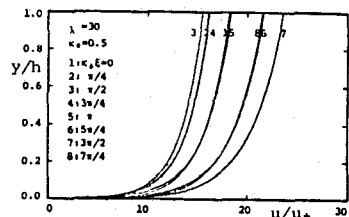


図-3-a 流速分布 (u/u_*)

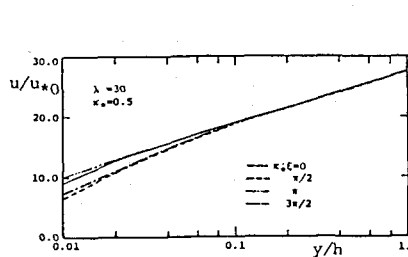


図-3-b 流速分布 (u/u_*)

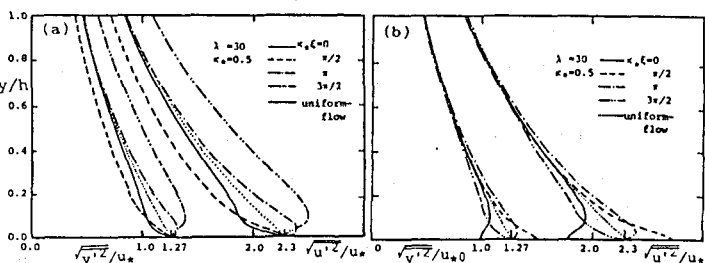


図-4 乱れ強度分布

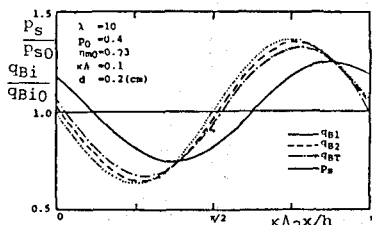


図-5-a 流砂量変動 (線形解析)

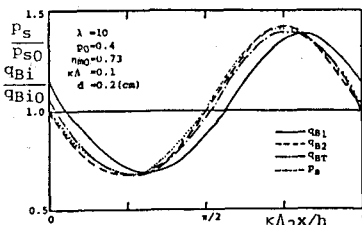


図-5-b 流砂量変動 (非線形解析)

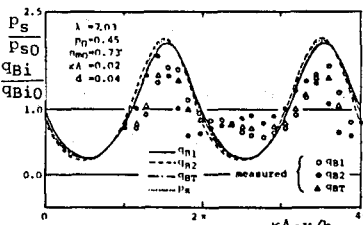


図-6 流砂量変動 (実測値との比較)

参考文献: 1)辻本・本橋: 33水講, 1989. 2)Jacobs: ZAMM 19, 1939. 3)池田・伊勢屋: 30水講, 1986.