

遷移層が砂州の形状特性に与える影響

Effect of transition layer to the form peculiarity of sandbars

北海道大学大学院 ○学生員 中西哲 (Satoru Nakanishi)
 (株) 国土防災技術 正会員 松山洋平 (Youhei Matsuyama)
 北海道大学大学院 フェロー 黒木幹男 (Mikio Kuroki)

1. はじめに

河川における砂州の形状及びその挙動を予測する事は、我が国の河川の状態を考えるとその基礎的構造を知る上で大変重要である。古くから、中規模河床形態の砂州に関する様々な実験、数値計算等の研究が行われてきた。これらの研究によって、河川維持管理・計画あるいは治水・利水などの技術も非常に進歩している。

混合砂を河床材料とした研究についても同様に、多数行われてきた。混合砂床においては河床変動に伴う各粒径の粒度分布を数値的に求めることが重要であり、従来より、河床面を含む河床表面層（混合層あるいは交換層と呼ばれる）の概念がよく用いられてきた。この概念によると交換層下は常に元河床ということになる。しかしながら、実現象において堆積、侵食のプロセスを経た結果、交換層下には元河床ではない粒度分布が堆積した分だけ存在するはずである。そのため、混合砂床上のある地点における河床表面層の粒度分布を解くためには交換層のみならず、交換層下の幾重にも連なった層の粒度分布が必要となる。芦田・江頭・劉¹⁾は交換層下に遷移層と堆積層の概念を導入し、粒度分布の鉛直方向の変化を数値的に求めるモデルを提案した。

本研究では単矩形断面の直線水路に混合砂の河床材料を用い、交換層下に存在する幾重にも連なる層を一時的な層（遷移層）とひとまとまりにしたモデルを提案し、このモデルを導入することにより、遷移層または遷移層中の粒度分布が砂州の形状・挙動に対する影響を考察する。

2. 計算方法

本研究では、流れに関しては清水・板倉²⁾と同様に、二次元浅水流モデルを用いる。流砂量並びに各層に占める粒度分布は以下に示す。

(i) 流砂量、河床高の計算

各粒径の流下方向、横断方向の流砂量 q_{Bni} , q_{Bsi} は次の粒径別の Meyer-Peter-Müller の式(2)及び、長谷川の式(3)よりもとめる。

$$\frac{q_{Bsi}}{\sqrt{sgd_i^3}} = 8P_i(\tau_{*i} - \tau_{*c})^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

$$q_{Bni} = q_{Bsi} \left(\frac{v}{u} - N_* \frac{h}{r} - \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\mu_s \mu_k \tau_{*i}}} \frac{\partial z}{\partial n} \right) \quad (2)$$

ただし、 P_i は粒径 d_i が交換層中に占める割合を、 τ_{*c} 、 τ_{*i} はそれぞれ各粒径の無次元限界せん断力、無次元有効せん断力、 μ_s 、 μ_k はそれぞれ河床材料の静止及び動摩擦係数、 z は河床高である。各粒径の無次元限界せん断力 τ_{*ci} は浅田の式³⁾、無次元有効せん断力 τ_{*i} は岸・黒木による式で求める。

以上の式より求めた流砂量の合計から、流砂の連続式(3)を用いて河床高を求めた。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bs}}{\partial s} + \frac{\partial q_{Bn}}{\partial n} \right) = 0 \quad (3)$$

ここで、 λ は河床材料の空隙率である。

(ii) 各層における粒度分布の計算

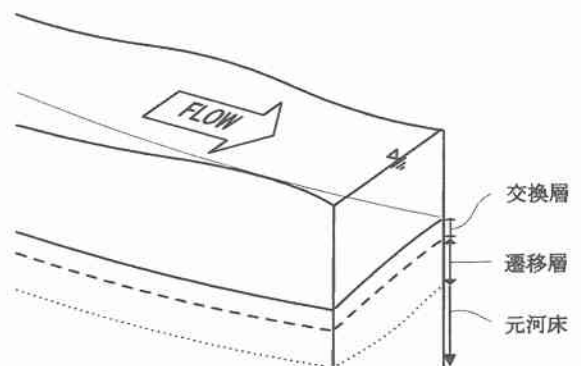


図-1 河床の概念図

図-1 に河床の概念図を示した。ここで、 a は交換層厚、 δ は遷移層厚、 z は河床高とする。また、粒径 d_i が交換層、遷移層、元河床に占める割合をそれぞれ、 P_i 、 P_δ 、 P_0 とした。交換層厚 a は変化せず、本研究では河床材料の最大粒径で与えた。遷移層厚 δ は流砂量によって変化し、各層の粒度分布の計算については平野の方法⁴⁾を発展させる形をとった。

河床変動は上昇、下降の2つの場合に分けられ、 P_i の時間的変動は前者において交換層の粒度はそれより下の河床の粒度分布には無関係であるから交換層の粒度分布のみ影響を受けるのに対し、後者では交換層はそれより下の河床砂礫を層内に繰り込むことになり交換層下の粒度分布の影響を受ける。また、本研究では遷移層を導入したことによって、 δ が δ より小さい場合は遷移層の、大きい場合は遷移層と元河床両方の粒度分布の影響を受ける。したがって、河床が上昇する場合と下降する場合、

下降する場合は Δz が遷移層厚 δ よりも大きい小さいか、合計 3 つのケースについて想定しなければならない。これらの考え方と流砂の連続条件より、それぞれのケースについての P_i 、 P_{ii} 並びに δ の各パラメータに関する計算式を導くことができる。

以下に各ケースのステップ n と次ステップ $n+1$ における河床の概略図とそれぞれの計算式を示す。

(a) $\Delta z > 0$ のとき

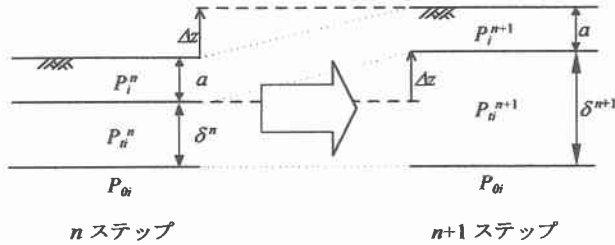


図-2 河床変動の概略図(1)

河床変動は図-2 のようになる。河床が上昇する、つまり河床材料が堆積するので交換層における粒度分布 P_{ii} の時間変化は交換層下の粒度分布の影響を受けない。よって、 P_{ii} は式(4)で表される。

P_{ii} は堆積した Δz の P_{ii} の影響を受け、また δ は Δz だけ上昇するので、 P_{ii} 並びに δ は次の(5)、(6)のようになる。

$$a \frac{\partial P_{ii}}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bsi}}{\partial s} + \frac{\partial q_{Bni}}{\partial n} \right) + P_{ii} \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

$$\delta^{n+1} P_{ii}^{n+1} = \delta^n P_{ii} + P_{ii} \frac{\partial z}{\partial t} dt \quad (5)$$

$$\delta^{n+1} = \delta^n + \frac{\partial z}{\partial t} dt \quad (6)$$

(b) $\Delta z < 0$ かつ $|\Delta z| < \delta$ のとき

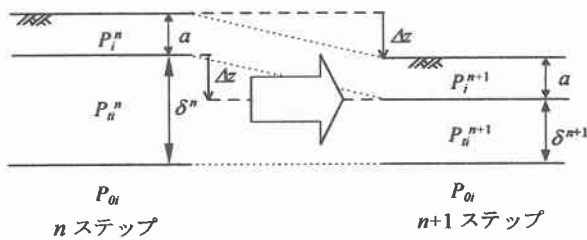


図-3 河床変動の概略図(2)

図-3 のように河床が侵食されるとすると、 P_{ii} は Δz の河床低下分、遷移層厚の粒度分布の影響を受ける。よって、 P_{ii} は式(7)で表される。

P_{ii} は侵食されなかった遷移層の粒度分布が次ステップの P_{ii} となるので変化しない。また、 δ は河床の低下分減少する。よって、 P_{ii} 並びに δ は次の式(8)、式(9)のように表すことができる。

$$a \frac{\partial P_{ii}}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bsi}}{\partial s} + \frac{\partial q_{Bni}}{\partial n} \right) + P_{ii} \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

$$P_{ii}^{n+1} = P_{ii}^n \quad (8)$$

$$\delta^{n+1} = \delta^n + \frac{\partial z}{\partial t} dt \quad (9)$$

(c) $\Delta z < 0$ かつ $|\Delta z| > \delta$ のとき

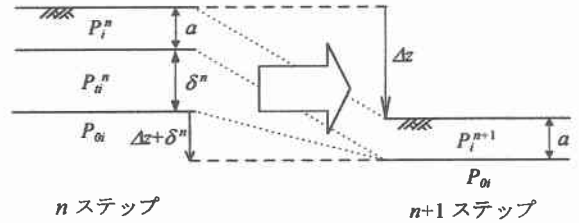


図-4 河床変動の概略図(3)

河床変動は図-4 のようになる。 P_{ii} の時間変化は河床の低下に伴い遷移層全体と元河床の粒度分布の影響を受けるため、式(10)で表される。

また、侵食によって遷移層が消滅するため、 P_{ii} は存在せず、 δ は式(11)に示すように 0 になる。

$$a \frac{\partial P_{ii}}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bsi}}{\partial s} + \frac{\partial q_{Bni}}{\partial n} \right) + P_{0i} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\delta^n}{dt} (P_{0i} - P_{ii}) = 0 \quad (10)$$

$$\delta^{n+1} = 0 \quad (11)$$

3. 計算条件

水理条件は流量 $Q=0.0114\text{m}^3/\text{sec}$ 、水路長 $L=15\text{m}$ 、水路幅 $B=0.9\text{m}$ 、河床勾配 $I=1/250$ 、河床材料の水中比重 $S=1.65$ とし、黒木・岸⁹⁾の砂州の形成領域区分では交互砂州が発生するものとした。

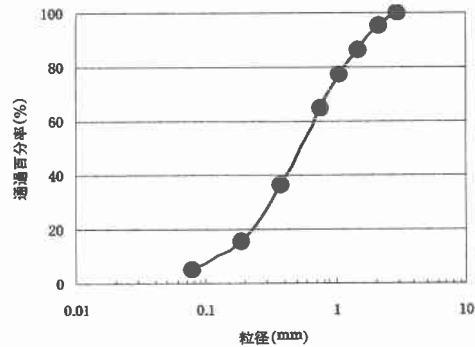


図-5 河床材料の粒径加積曲線

粒度分布は図-5 に示すような平均粒径が 0.9mm である混合砂を与えた。初期河床において遷移層厚は存在せず、交換層および元河床の粒度分布はともに上記のものを与えた。

初期河床形状は平坦床であり、上流部右岸に直方体擾乱を与えた。初期河床において遷移層厚は存在せず、交換層および元河床の粒度分布はともに上記のものを与えた。上流、下流の水理量の境界条件は周期条件を用いた。

また Manning の粗度係数 n は河床がフラットであると仮定し、平均粒径を用いた次式(12)を与えた。

$$n = \frac{d_m^{1/6}}{6.9\sqrt{g}} \quad (12)$$

ただし、 d_m は平均粒径、 g は重力加速度とする

これらの式を差分法により離散化し、繰り返し計算により、流速、水位、河床変動量および交換層、遷移層における粒度分布を求めた。また、遷移層を考慮しないケース、粒径が混合砂の平均粒径 0.9mm と等しい一様砂、表-1 に示す合計 3 つのケースについて計算し、比較し考察する。

	遷移層	河床材料
Case1	考慮する	混合砂
Case2	考慮しない	混合砂
Case3		一様砂

表-1 各ケースの遷移層の有無および河床材料

4. 計算結果・考察

計算の結果得られた遷移層の有無、河床材料により異なった結果を得た。

図-6 に波高の時間変化を示す。Case1 と Case2 で大きな違いが見られる。また、今回の計算時間内では Case1 において波高は安定せずに上昇している。混合砂と一様砂の波高を比較した場合、一様砂の方が高くなる⁹⁾が今回の結果では計算経過時間 1100 分付近で一様砂と混合砂が逆転した。図-7 に平均遷移層厚の時間変化を示す。平均遷移層厚は経過時間 500 分程度で急激に上昇する現象が見られる。これは図-6 における Case1 と Case2

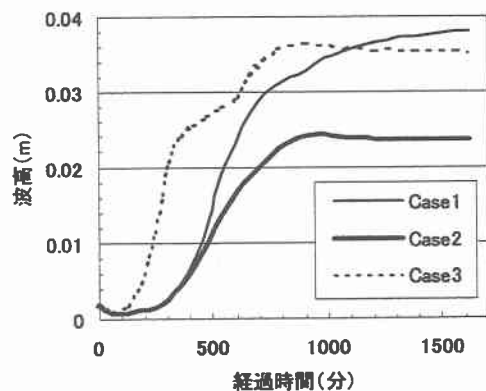


図-6 波高と計算時間の関係

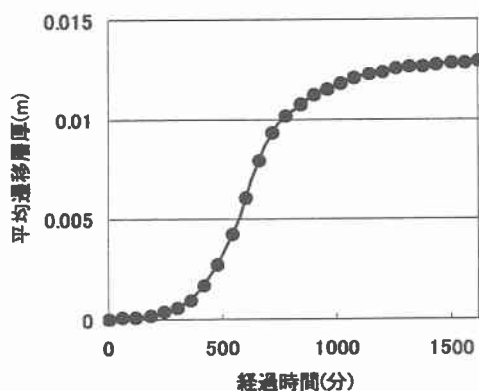


図-7 平均遷移層厚の時間変化

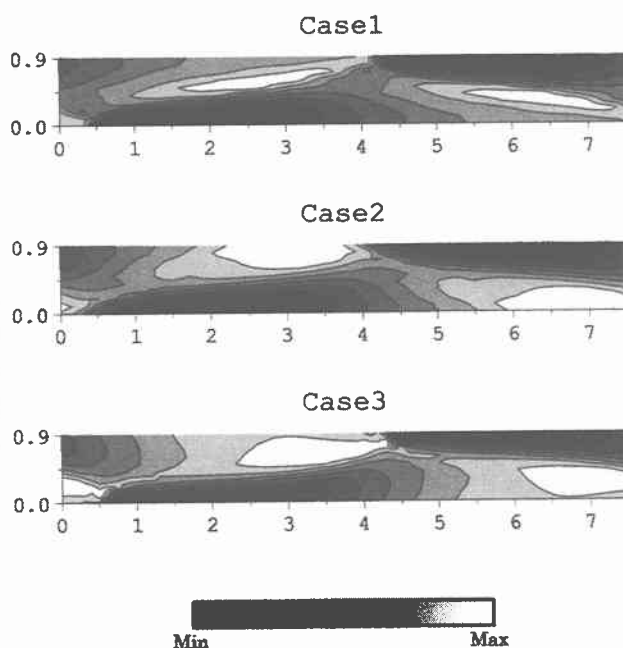


図-8 河床コンター図

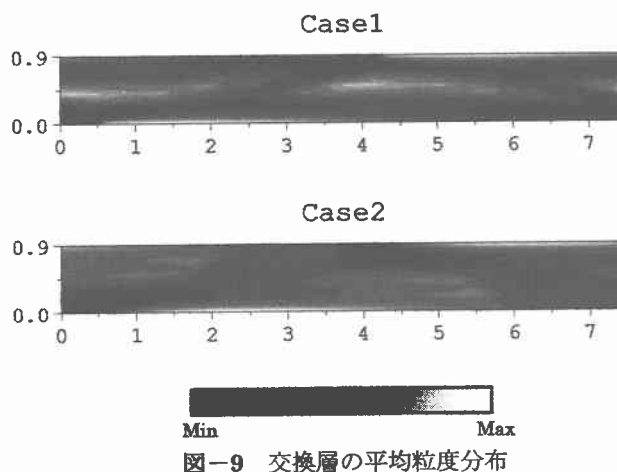


図-9 交換層の平均粒度分布

の挙動が分岐する時間と等しい。また、平均遷移層厚は波高安定せずに上昇している。以上のことより、遷移層が砂州の形成過程において重要な役割を担っていると考えられる。

図-8、図-9 はそれぞれ河床が安定したと思われる

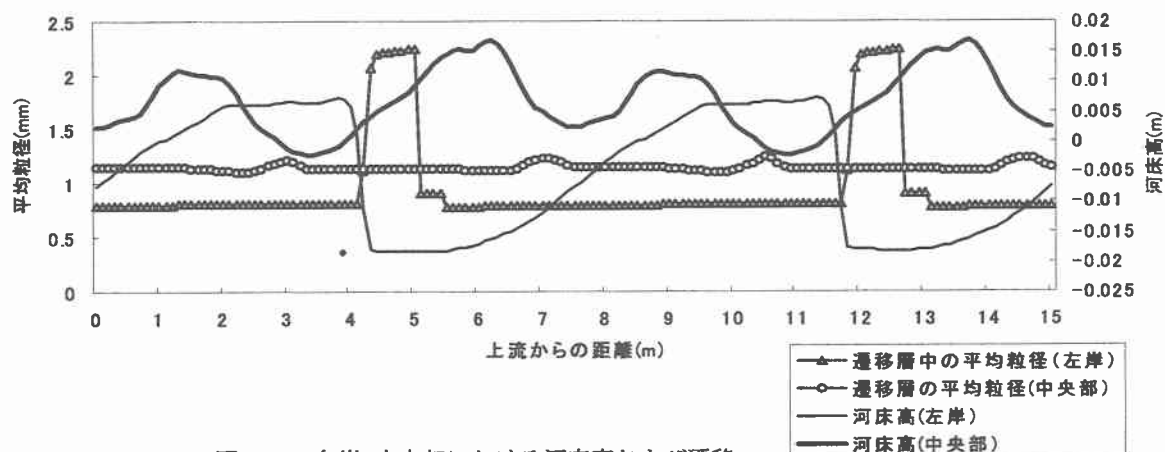


図-10 左岸・中央部における河床高および遷移層中の平均粒径の縦断面図

時間の河床コンター図と交換層における平均粒度分布を上流から 7.5m の位置まで表したものである。15m の直線水路では各ケースとも砂州の波長は 2 波長と等しくなった。平均粒度分布は Case1、Case2 とともに河床の洗掘部で粗粒化し砂州の前縁では細粒化している。また、遷移層を考慮した Case1 では Case2 とは異なり、水路中央部で分級現象がみられ砂州と砂州の結合点で粗粒化が卓越している。

図-10 に Case 1 における水路左岸および中央部の河床高と遷移層の平均粒度分布の縦断面図を示す。水路左岸における洗掘部では交換層と同様に粗粒化しているが、その他の地点ではほぼ一定値を取っている。水路中央部の縦断面形において平均粒度分布はあまり変化せず河床の起伏によってわずかな変化が見られるにとどまった。このような現象の原因としては、遷移層厚に対して流砂量勾配が小さいため砂州の前縁から洗掘部といった極端な流砂量勾配が見られる地点でしか遷移層に影響を及ぼさないためだと考えられる。

5. 終わりに

本研究によって、波高、河床形状、交換層中の粒度分布について遷移層の有無で異なる結果を得ることが確かめられた。広範囲に及ぶ粒度分布を有する河床材料では、その傾向はより顕著なものになると考えられる。たとえば山地河川などでは交換層下の粒度分布について詳細に検討する必要があるであろう。

実現現象の遷移層について考えると砂州が安定すると交換層下も安定することが予想されるが、本研究では安定せずに遷移層厚が上昇を続ける傾向が見られた。また、本来交換層下には流砂の堆積により何層にも重なった層が存在するはずだが、今回のモデルでは便宜的に遷移層とひとつにした。そのため、厳密には交換層下の粒度分布は表されていない。

以上のことから、今後の課題となるのは、本研究のモデルもとにした精度の高い数値計算モデルを開発し、実験などのデータなどと比較しながらより詳細な検討をしていくことである。

参考文献

- 1) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義: 二層モデルによる複断面河道の流れおよび河床変動の数値解析, 京都大学防災研究所年報 第 35 号 B-2, pp.41-62, 1992.
- 2) 清水康行, 板倉忠興: 河川における 2 次元流れと河床変動の計算, 北海道開発局土木試験所報告 第 85 号, 1986.
- 3) 浅田: 山地河川の流砂量と貯水池における堆砂過程に関する研究, 北海道大学博士論文, 1974.
- 4) 平野宗夫: Armoring をともなう河床低下について, 土木学会論文報告集 第 195 号, pp.55-65, 1971.
- 5) 黒木幹男, 岸 力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集 第 342 号, pp.87-96, 1984.
- 6) 竹林洋史, 江頭進治: 混合砂河床における砂州の動態, 水工学論文集 第 45 巻 pp.727-732, 2001.