水工学論文集　第35巻　1991年２月

蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析

Numerical Method on Sediment Sorting and Bed Variation in Meander Channels

芦田　和男*・江頭　進治**・　劉　炳義***

By Kazuo Ashida, Shinji Egashira and Bingyi Liu

It is often found that a coarse surface layer exists in the outer-bank region, and a finer one in the inner-bank region in natural stream bends. This phenomenon generally results from the sorting of graded bed load. A method for the calculation of bed load discharge is proposed, in which the effects of bed slope and flow direction on sediment transport have been taken into accounts. Furthermore, a two-dimensional numerical simulation modelis developed, which is useful for predicting of the spatial and temporal variations of grain size distribution as well as of the bed configuration. Discussions are made on the sorting process and the effects of grain size distribution on the bed topography.

Keywords: graded bed material, sediment sorting, bed load discharge, numerical model, meander channel

1. 緒　言

広い粒度分布を持つ混合砂礫から構成されている流路の一次元河床変動の解析に関しては、多くの研究が行われてきた。しかし、河床材料の粒度分布の変化、すなわち粒度のsortingを考慮した二次元的な河床変動に関する研究は、まだ数少ない。蛇行流路のような曲率をもつ流路におけるsorting現象は、二次流や流路形状（横断勾配）の影響によって流砂量と流砂の方向が粒径ごとに異なることにより、直線流路におけるものと異なり、二方向性（縦・横断）を持つ。実河川の河床において、一般に内岸側が細粒化し、外岸側が粗粒化しているのはそのためである。

混合砂礫からなる蛇行・湾曲流路の河床形状および粒度分布に関しては、これまでにいくつかの研究がなされてきた。池田ら[1]は、川幅－水深比が大きく、河床の横断勾配が比較的小さい領域を対象として強制渦型の流速分布を用いて二次流を求めた。さらに、この結果を用いて、横断方向の流砂量が動的平衡状態において0となることより、平衡横断形状および粒径分布の式を導いた。一方、Parker & Andrews[2]は、蛇行流路における平均粒径の場所的変化について線形一次の解を求めている。しかし、これらの研究は静的、あるいは動的平衡状態の粒度分布の特性を論じたもので、河床変動に伴う粒度分布の時間的、空間的な変化を評価することを目的としたものではない。

*　正会員　工博　京都大学防災研究所教授　（〒611　宇治市五ヶ庄）
**　正会員　工博　京都大学防災研究所助教授　（〒611　宇治市五ヶ庄）
***　学生員　工修　京都大学大学院博士課程　（〒611　宇治市五ヶ庄）

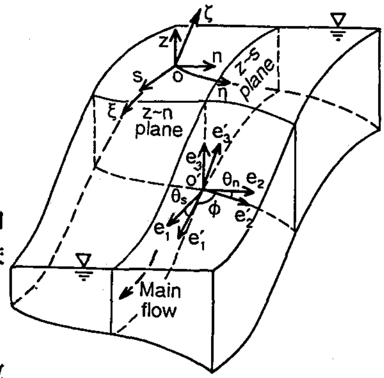
著者ら[3]は、蛇行流路における混合砂のSorting機構および河床形状に関して、実験的、数値解析的に考察を行なった。それによれば、平均粒径の等しい一様砂の場合の平衡河床形状と比べ、混合砂の場合には,(a)洗掘深が小さくなっていること、(b)砂州の位置がより下流へシフトしていること、および(c)内岸の堆積規模は、外岸の洗掘規模と比べ、促進されていること、などの特徴が見出されている。

本論文は、上の研究に引き続くものである。まず深掘れや砂州のような縦・横断勾配を無視できない床面上での掃流砂量の算定方法を提案する。ついで、二次元浅水流モデルを基にし、粒度分布の変化をも考慮できる二次元河床変動の数値シミュレーシ ョンをもちいて、蛇行流路における混合砂礫の分級過程および平衡河床形状に対する粒度分布の影響を明らかにする。

2. 縦・横断勾配を持つ三次元河床上の掃流砂量式

2.1 座標系の定義

図−1は、縦・横断勾配を持つ三次元河床の模式図である。水平面において、主流方向をs軸、それと直交する方向をn軸とし、鉛直方向をz軸とする。軸の向きは図示のように右手法則に従う。s-z面と河床の交線をξ軸、n-z面と河床の交線をη軸とし、河床と垂直する方向をζ軸とする。河床上にある任意の点0 における {s,n,z} 座標系上の単位ベクトルを、 {e_1, e_2, e_3} とし、 {ξ, η, ζ} 座標系上の単位ベクトルを {e_1', e_2', e_3'} とする。両者の関係をマトリクスで表示すると、次のようである。



図−1 座標系の定義図

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_s & 0 & \sin\theta_s \\ 0 & \cos\theta_n & \sin\theta_n \\ -\sin\theta_s\cos\theta_n/\sin\phi & -\cos\theta_s\sin\theta_n/\sin\phi & \cos\theta_s\cos\theta_n/\sin\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} \tag{1}$$

ここに、θ_s、θ_n、ϕは、それぞれe_1とe_1、e_2とe_2、e_1とe_2の交角であり、

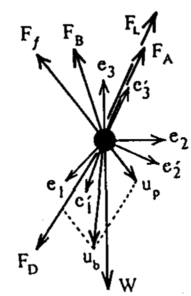
$$\theta_s = \arctan(\partial z/\partial s) \tag{2}$$ $$\theta_n = \arctan(\partial z/\partial n) \tag{3}$$

$$\phi = \arccos(\sin\theta_s \sin\theta_n) \tag{4}$$

という関係がある。

2.2 傾斜床面上における砂粒子の限界掃流力

図−2に示すような河床上を運動する砂粒子に働く力を考える。座標変換に伴うCoriolis forceおよび遠心力を無視すれば、砂粒子に働く力としては、図−2に示すように流体抗力（F_D）、流体揚力（F_L）、重力（W）、浮力（F_B）、斜面による抗力（F_A）および粒子と床面との間の摩擦力（F_f）と考えられる。これらの力はベクトルで表示すれば、



図−2 粒子に働く力

$$W = -\rho_s A_3 g D^3 e_3 \tag{5}$$ $$F_B = \rho A_3 g D^3 \cos\theta_s(-\sin\theta_s e_1 + \cos\theta_s e_3) \tag{6}$$

$$F_L = K_L F_D e_3' \tag{7}$$ $$F_f = -\mu_k F_A \cdot u_p/|u_p| \tag{8}$$

$$F_D = (1/2)\rho K_s C_D A_2 D^2 |u_b - u_p|(u_b - u_p) \tag{9}$$

$$F_A = \{(\cos\theta_s\cos\theta_n/\sin\phi)\rho R A_3 g D^3 - K_L F_D\}\, e_3' \tag{10}$$

となる。ここに、D: 粒径、ρ: 流体の密度、ρ_s: 砂粒子の密度、$R \equiv \rho_s/\rho - 1$、g: 重力の加速度、A_2, A_3: 砂粒子の面積および体積係数、K_s: 周辺の砂粒子の存在による遮蔽係数、C_D: 抗力係数、K_L: 揚力と抗力の比例係数、μ_k: 砂の動摩擦係数、u_b: 底面の流速ベクトル、u_p: 砂粒子の移動速度ベクトルである。

重力と浮力の和をF_sとし、それの {e_1', e_2'} 面上の成分をF_{s12}とする。すなわち

$$F_S \equiv W+F_B = F_{S12} - a_{s3}\rho R A_3 g D^3 e_3' = -\rho R A_3 g D^3\ \{a_{s1}\sin\theta_s e_1' + a_{s2}\sin\theta_n e_2' + a_{s3} e_3'\} \tag{11}$$

ただし、 $a_{s1} = (\cos^2\theta_n + \sin^2\phi/R\}\ /\sin^2\phi$ (12)

$$a_{s2} = \cos^2\theta_s/\sin^2\phi \tag{13}$$

$$a_{s3} = \cos\theta_s\cos\theta_n/\sin\phi \tag{14}$$

移動限界（図－3を参照）において、摩擦力が最大静止摩擦力となり、且つ砂に作用する駆動力（F_D+F_{S12}）と釣り合っている。すなわち

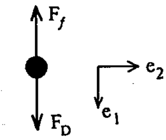
$$F_f + F_D + F_{S12} = 0 \tag{15}$$

流体抗力および摩擦力は、それぞれ次のように表わされる。

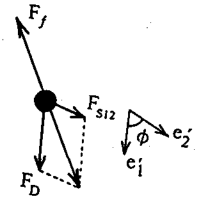
$$F_D \equiv F_D(a_{D1}e_1' + a_{D2}e_2') = (1/2)\rho K_S C_D A_2 D^2 u^2_{bc}(a_{D1}e_1' + a_{D2}e_2') \tag{16}$$

$$F_f = \mu_s(a_{s3}\rho A_3 g D^3 - K_L F_D) \tag{17}$$

ここに、μ_s：砂の静止摩擦係数、添字c：移動限界状態の意味、a_{D1}，a_{D2}：底面流速の流向を表わす係数である。s,n方向の底面流速u_{bs},u_{bn}あるいはその方向角α（$\equiv\arctan(u_{bn}/u_{bs})$）が与えられたとき、$a_{D1}$,$a_{D2}$は、それぞれ次のように求められる。



(a) 水平床上



(b) 傾斜床面上

図－3 移動限界時

$$a_{D1} = \cos\theta_n/(\cos^2\theta_n + \cos^2\theta_s + \tan^2\alpha + 2\cos\theta_s\cos\theta_n\tan\alpha\cos\phi)^{1/2} \tag{18}$$

$$a_{D2} = \cos\theta_s\tan\alpha/(\cos^2\theta_n + \cos^2\theta_s + \tan^2\alpha + 2\cos\theta_s\cos\theta_n\tan\alpha\cos\phi)^{1/2} \tag{19}$$

一方、水平床上における移動限界状態の砂粒子に働く力の釣合式より、その無次元限界掃流力（$\tau_{*c0} = u^2_{*c0}/(RgD)$）について、次式が得られる。

$$\tau_{*c0} = 2A_3/(K_S C_D A_2 A_r^2)\cdot\mu_s/(1+\mu_s K_L) \tag{20}$$

ここに、$A_r \equiv u_b/u_*$（対数則より）。上式を用いて、斜面上の流体抗力が次のように書き換える。

$$F_D = \mu_s/(1+\mu_s K_L)\rho R A_3 g D^3\cdot\tau_{*c}/\tau_{*c0} \tag{21}$$

ここに、$\tau_{*c} \equiv u_{*c}^2/(RgD)$：傾斜床面上における砂粒子の無次元限界掃流力である。(17)と(21)式を(15)式に代入して、τ_{*c}について解くと

$$\tau_{*c} \equiv K_C\tau_{*c0} \tag{22}$$

$$K_c = \left(\frac{1}{\mu_s} + K_L\right)\frac{\sqrt{B^2 - AC} + B}{A} \tag{23}$$

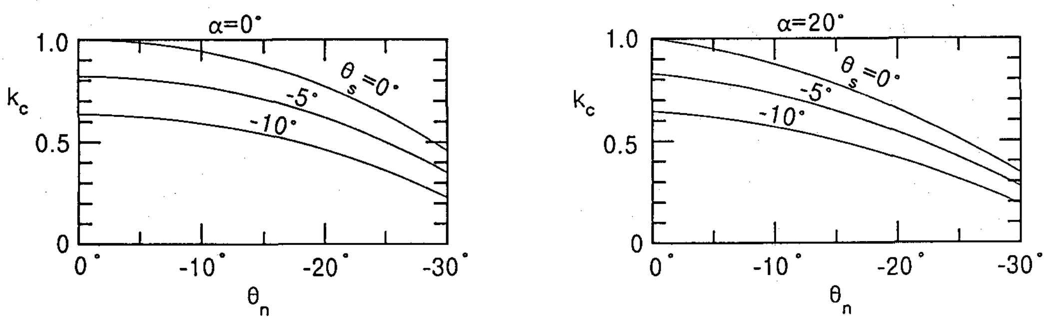
が得られる。ここに、係数A,B,Cは、それぞれ次のように求める。

$$A = a_{D1}^2 + a_{D2}^2 + 2a_{D1}a_{D2}\cos\phi - (\mu_s K_L)^2 \tag{24}$$

$$B = (a_{D1} + a_{D2}\cos\phi)a_{s1}\sin\theta_s + (a_{D1}\cos\phi + a_{D2})a_{s2}\sin\theta_n - a_{s3}\mu_s^2 K_L \tag{25}$$

$$C = (a_{s1}\sin\theta_s)^2 + (a_{s2}\sin\theta_n)^2 + 2a_{s1}a_{s2}\cos^2\phi - (a_{s3}\mu_s)^2 \tag{26}$$

図－4は以上の式を用いて、係数K_cと縦・横断勾配θ_s,θ_nおよび流向αとの関係について計算した結果である。この図より、床面の勾配が限界掃流力に大きな影響を与えることが分かる。



図－4　　　　K_cと勾配および流向の関係曲線

2.3 傾斜床面上における掃流砂量

従来より、多くの掃流砂式が提唱されている。水平床上の流砂量(q_{b0})は、一般に次のように表わされる。

$$q_{b0}=\Omega(\tau_{*0},\tau_{*c0}) \tag{27}$$

ここに、τ_{*0}は水平床上における砂粒子に作用する無次元掃流力である。水平床面上の砂粒子と比べ、傾斜床面上の砂粒子に働く駆動力として、流れによるもの以外に斜面勾配による重力と浮力の成分（F_{S12}）が加えられている。その効果を見かけ上の掃流力として評価する。

$$F_D : \tau_{*f} = F_{S12} : \tau_{*g} \tag{28}$$

とすると、

$$\tau_{*g}=-(1/\mu_s+K_L)\tau_{*c0}\ \{a_{s1}\sin\theta_s e_1'+a_{s2}\sin\theta_n e_2'\} \tag{29}$$

が得られる。ここに、τ_{*g}は斜面勾配による重力と浮力の粒子に与える見かけ上の無次元掃流力ベクトル、τ_{*f}は、傾斜床面に働く流れの無次元掃流力ベクトルである。

$$\tau_{*f}=\tau_{*0}\ \{(\cos\alpha/\cos\theta_s)e_1'+(\sin\alpha/\cos\theta_n)e_2'\} \tag{30}$$

ここに、$\tau_{*0}=(\tau^2_{bs}+\tau^2_{bn})^{1/2}/\{(\rho_s-\rho)gD\}$、$\tau_{bs}$, τ_{bn}は、それぞれs軸とn軸の床面せん断力である。

従って、傾斜床面上の砂粒子に作用する無次元掃流力（τ_*）は

$$\tau_*\equiv\tau_{*f}+\tau_{*g} \tag{31}$$

となる。水平床面上の流砂運動がτ_{*0}とτ_{*c0}によって決定されるとすると、傾斜床面上の流砂運動がτ_*とτ_{*c}によって決定されると考えられ、以上の議論より、その流砂量は次式のように表わされると想定できる。

$$q_b=\Omega(\tau_*,K_c\tau_{*c0}) \tag{32}$$

ここで、q_{b0}の算定に芦田・道上式を採用することにすると、q_bは次式より求められる。

$$q_b/(RgD^3)^{1/2}=17\tau_*^{3/2}(1-K_c\tau_{*c0}/\tau_{*f})\{1-(K_c\tau_{*c0}/\tau_{*f})^{1/2}\} \tag{33}$$

辻本・細川[3]の研究によれば、(33)式のような取り扱いが合理的である。

2.4 縦・横断流砂量の比

前節において、傾斜床面上の全流砂量の求め方について論じたが、河床変動の計算に実際に必要とするのは(s,n,z)座標系でのs方向の流砂量q_{bs}（縦断方向流砂量）とn方向の流砂量q_{bn}（横断方向の流砂量）である。

$$q_b\equiv q_{b1}e_1'+q_{b2}e_2'\equiv q_{bs}e_1+q_{bn}e_2+q_{bz}e_3 \tag{34}$$

上式より、

$$q_{b1}=q_{bs}/\cos\theta_s \tag{35}$$

$$q_{b2}=q_{bn}/\cos\theta_n \tag{36}$$

従来、流砂量ベクトルの方向は床面近傍に存在するある砂粒子の移動方向と一致すると仮定し、砂粒子を近似的に定常運動と扱ってそれに働く力の釣合式より、それを求めている。しかし、掃流層における砂粒子の平均移動方向を質点の運動方程式より求めるのはきわめて困難である。ここでは、流砂量ベクトルの方向、すなわち掃流層の全砂粒子の平均移動方向は無次元掃流力ベクトル（τ_*）の方向に一致すると仮定する。

$$q_b=q_b\cdot\tau_*/\tau_* \tag{37}$$

従って、縦・横断流砂量の比は、

$$\frac{q_{bn}}{q_{bs}}=\frac{sin\alpha-\Pi\,\Theta_n\dfrac{\tau_{*c0}}{\tau_{*0}}\dfrac{\partial z}{\partial n}}{cos\alpha-\Pi\,\Theta_s\dfrac{\tau_{*c0}}{\tau_{*0}}\dfrac{\partial z}{\partial s}} \tag{38}$$

となる。ここに、$\Pi=(1/\mu_s+K_L)$, $\Theta_n=1/(1+\tan^2\theta_s+\tan^2\theta_n)$, $\Theta_s=(\Theta_n+\cos^2\theta_s/R)$である。上式において、$\theta_s=0$、且つ$\cos\theta_n\fallingdotseq 1$とすれば、

$$\frac{q_{bn}}{q_{bs}}=tan\alpha-\frac{\Pi}{cos\alpha}\frac{\tau_{*c0}}{\tau_{*0}}\frac{\partial z}{\partial n} \tag{39}$$

が得られる。この式は、池田ら[1]、Parker&Andrews[2]の式とほぼ同形である。

3. 数値シミュレーションモデルおよびその検証

3.1 支配方程式

混合砂礫床蛇行流路の二次元河床変動ならびに粒度分布の数値計算に際し、流れの計算には、二次元浅水流モデルを適用する。

$$\frac{\partial(uh)}{\partial s}+\frac{1}{r}\frac{\partial(rvh)}{\partial n}=0 \tag{40}$$

$$u\frac{\partial u}{\partial s}+v\frac{\partial u}{\partial n}+\frac{uv}{r}=-g\frac{\partial(z_b+h)}{\partial s}-\frac{\tau_{bs}}{\rho h}+2\frac{\partial}{\partial s}(\varepsilon\frac{\partial u}{\partial s})+\frac{\partial}{\partial n}(\varepsilon\frac{\partial u}{\partial n}) \tag{41}$$

$$u\frac{\partial v}{\partial s}+v\frac{\partial v}{\partial n}-\frac{u^2}{r}=-g\frac{\partial(z_b+h)}{\partial n}-\frac{\tau_{bn}}{\rho h}+2\frac{\partial}{\partial n}(\varepsilon\frac{\partial v}{\partial n})+\frac{\partial}{\partial s}(\varepsilon\frac{\partial v}{\partial s}) \tag{42}$$

ここに、(40)式は流れの連続式、(41)式と(42)式は、それぞれs-方向およびn-方向の運動方程式、u,vは、それぞれs,n方向の流速成分、hは水深、rはs-linesの曲率半径、z_bは河床位、τ_{bs}, τ_{bn}は、それぞれs,n方向の河床せん断力、εは渦動粘性係数である。$\tau_{bs}/\rho=C_f u(u^2+v^2)^{1/2}$, $\tau_{bn}/\rho=C_f v(u^2+v^2)^{1/2}$, $\varepsilon=\kappa u_* h/6$とする。ここに、$C_f$は抵抗係数である。

河床材料を離散変量として扱う。従って、河床変動方程式（流砂の連続式）および河床表層の粒度分布式は、質量保存則より、それぞれ次のように表される。

流砂の連続式

$$\frac{\partial z_{bk}}{\partial t}+\frac{1}{(1-\lambda)}\left\{\frac{\partial q_{bsk}}{\partial s}+\frac{1}{r}\frac{\partial(rq_{bnk})}{\partial n}\right\}=0 \tag{43}$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t}=\sum_{k=1}^{n}\frac{\partial z_{bk}}{\partial t} \tag{44}$$

交換層の粒度分布式

$$\frac{\partial f_{bk}}{\partial t}+\frac{1}{(1-\lambda)E_l}\left\{\frac{\partial q_{bsk}}{\partial s}+\frac{1}{r}\frac{\partial(rq_{bnk})}{\partial n}\right\}+\frac{1}{E_l}\frac{\partial z_b}{\partial t}\{\eta f_{bk}+(1-\eta)f_{bk0}\}=0 \tag{45}$$

ここに、下付きkは粒径階のindex、tは時間、λは河床材料の空隙率、z_{bk}は粒径階D_kに対応する仮の河床位q_{bsk},q_{bnk}はそれぞれ粒径階D_kのs,n方向の単位幅流砂量、f_{bk}は交換層の粒径階D_kの含有率、f_{bk0}は交換層の下層の粒径階D_kの含有率、E_lは交換層の厚さ（D_{90}とする）、ηは係数、侵食の時η=0、堆積の時η=1である。

粒径階D_kの流下方向の単位幅流砂量q_{bk}の算定には、(46)式を用いて次のように求める。

$$\frac{q_{bk}}{\sqrt{R\,g\,D_k^3}}=17\,f_{bk}\,\tau_{*k}^{3/2}\left(1-\frac{K_C\,\tau_{*ck0}}{\tau_{*kf}}\right)\left(1-\sqrt{\frac{K_C\,\tau_{*ck0}}{\tau_{*kf}}}\right) \tag{46}$$

ただし、係数K_Cは(23)式より算定する。τ_{*ck0}は水平床上の粒径階D_kの無次元限界掃流力であり、(47)式で示す修正Egiazaroffの式[4]で評価する。

$$\frac{\tau_{*ck0}}{\tau_{*cm0}}=\begin{cases}1.64\ /(\log_{10}\ 19\,D_k/D_m)^2 & D_k/D_m\geq 0.4\\ 0.85\ D_m/D_k & D_k/D_m<0.4\end{cases} \tag{47}$$

ここに、τ_{*cm0}は水平床上における粒径D_mに対する無次元限界掃流力である。

従って粒径階D_kの縦・横断方向の単位幅流砂量q_{bsk}、q_{bnk}は、それぞれ（52）と（53）式で求める。

$$q_{bsk}=q_{bk}\cos\beta \tag{48}$$
$$q_{bnk}=q_{bk}\sin\beta \tag{49}$$

ただし、$\beta\equiv\arctan(q_{bnk}/q_{bsk})$、（38）式より算定される。

次に、底面流速u_b,v_bの評価について考察する。u_bについては、s方向に流速分布の対数則が成り立つと仮

定し、相当粗度高さの流速を用いることにすれば、

$$u_b=8.5\{C_f(u^2+v^2)\}^{1/2} \qquad (50)$$

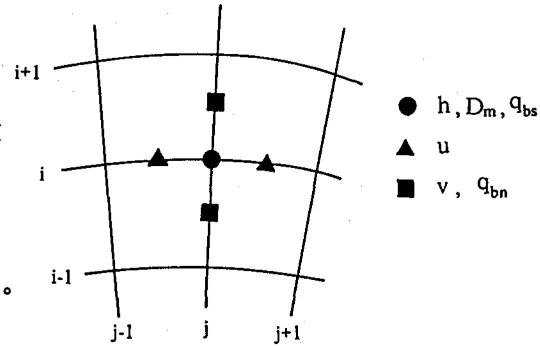
で与えられる。v_bについては、横断流速の水深方向の平均値(v)と水深方向に積分すると0になるようならせん流の底面成分(v_b')の和として与えられる。

$$v_b = v + v_b' \qquad (51)$$

ここに、vは上述の浅水流モデルによって解かれた値で与える。従来より一様湾曲流路における発達したらせん流の底面流速について、(52)式のような自由渦型の式が提唱されており、ここでは、蛇行流路においても(56)式が成立すると仮定してv_b'を算定する。

$$v_b' = -N_* u_b h/r \qquad (52)$$

ここに、N_*は係数であり、Engelund[5]の結果(N_*=7)を用いる。



図－5　計算変数の配置図

3.2 計算方法および境界条件

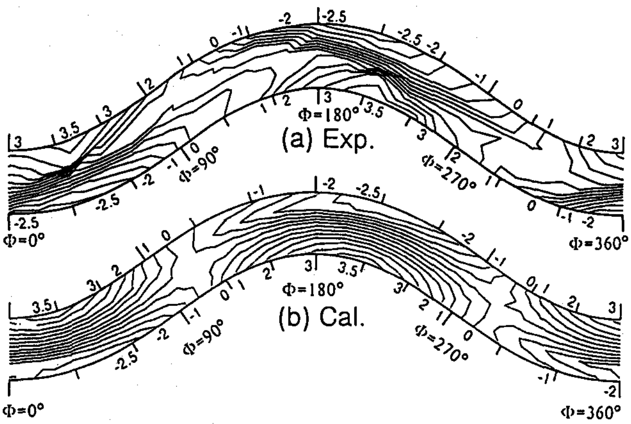
流れの定常解を解くために、Patankar[6]によって開発されたSIMPLE法を採用した。河床変動の解析に際し、流下方向に後退差分、横断方向に中央差分を用いている。各変数の計算点の配置は図－5に示すとおりである。本計算は、連続する蛇行流路一波長についての平衡解を求めるものであるため、その周期性を活かして、境界条件として上流端および下流端において、ある変数（流速、水深など）に対して(57)式のように与えた。

$$\Psi(n,0)=\Psi(n,2\pi) \qquad (53)$$

ここに、Ψは計算変数を表す。側壁においては、v=0とし、uについては、

$$\tau_w/\rho=C_w u^2 \qquad (54)$$

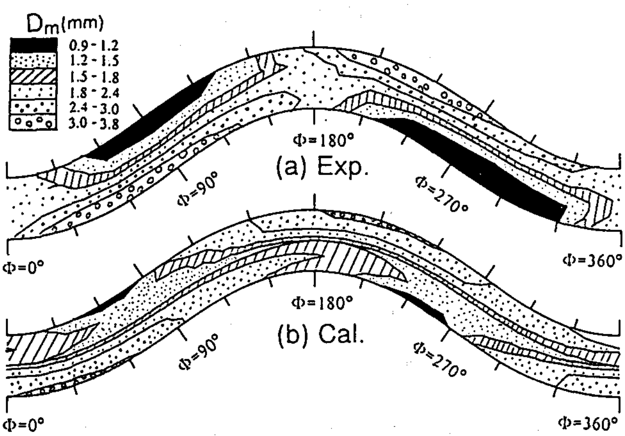
で与える。ここに、τ_wは側壁のせん断力、C_wは側壁摩擦係数である。



図－6　平衡河床形状の計算結果と実測値との比較

3.3 計算結果と実験値との比較

図－6と図－7は、それぞれ平衡河床形状および平均粒径分布の計算結果と著者ら[3]の実験結果との比較を示している。水理条件および流路の境界条件は，最大偏角θ_{max}=35°、蛇行長L=220cm、水路幅B=20cm、初期河床勾配i=0.009、流量Q=3.6(l/s)、平均粒径D_m=1.7mm、標準偏差σ $\{\equiv(D_{84}/D_{16})^{1/2}\}$



図－7　平均粒径分布の計算結果と実測値との比較

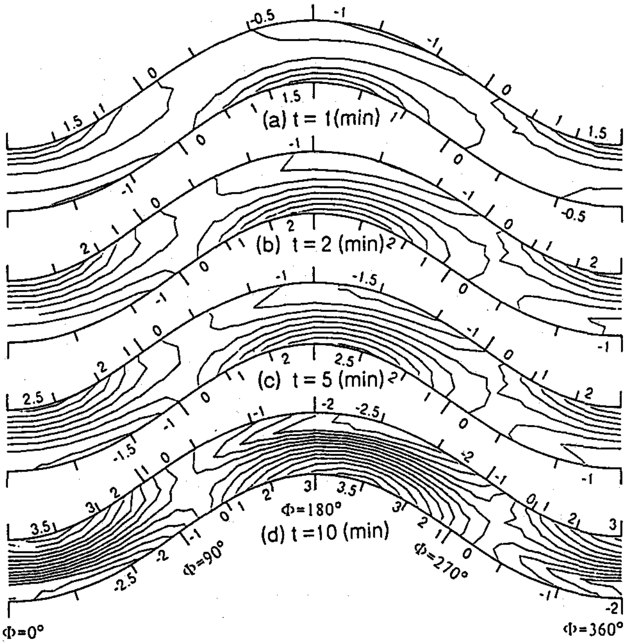
=2.2、D_{90}=4mmである。計算の際に用いられた諸係数の値は、μ_s=0.8、λ=0.4、N_*=7である。また、抵抗係数に関しては、実験の結果から換算した値を用いている。なお、計算中に、これらの係数の時間変化を考慮していない。実験結果と比較してみると、河床形状においては、両者はかなり一致しており、平均粒径分布においては、両者に若干違いが見られるものの、傾向としてはsortingによる粒度分布の変化の特性はほぼ再現されている。粒度分布のサンプルにも精度の問題があることを考えれば、シミュレーションモデルは妥当であると思われる。

4. 流砂の分級過程および粒度分布の河床形状への影響

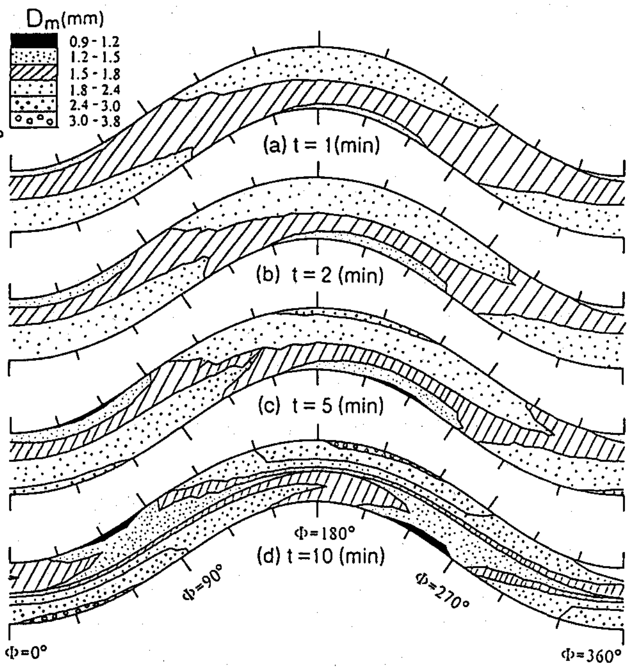
4.1 河床変動と分級過程

前述の数値解析モデルを用いて、河変変動と分級のプロセスを調べると、図－8と図－9のような結果を得る。計算条件は、3.3に述べられたものと同一である。上の解析は、境界条件として式(57)に示すように、1波長の上流端と下流端における流れ及び流砂の条件が等しくなるものとして行なっているため、水路上流端から十分離れた下流域で境界条件の影響が少なくなる領域に適用できるものである。しかし、一般の蛇行流路のsorting プロセスの変動の傾向は上の解析で知ることができよう。

さて、これらの結果によれば、全般には河床が侵食されている領域の材料は粗く、堆積領域では細かくなっている。河床変動が進行するに伴い、こうした傾向は強くなる。しかし、河床高の等高線と等粒径曲線とは相似ではなく、河床横断がほぼ水平に近い領域において、等粒径曲線がほぼ水路軸に平行になっている。これは、二次流の発達する領域で分級を受けた粒子が蛇行曲率の変化領域をそのまま通過することによるものである。また、河床形状についてみれば、深掘れの位置は時間とともに上流側にシフトし、砂州の位置は



図－8　　河床形状の変動過程

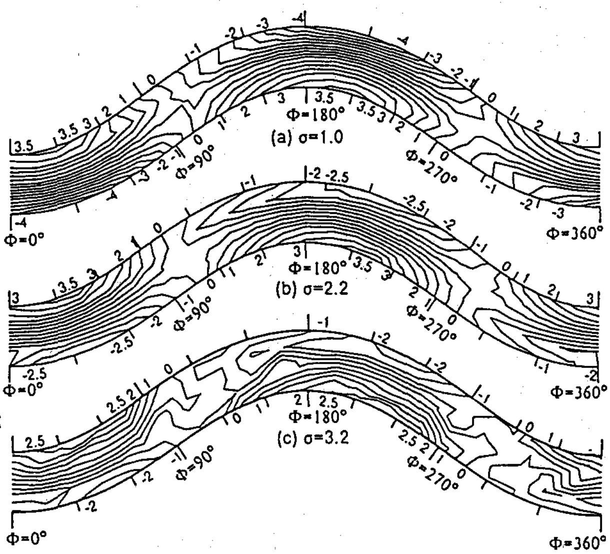


図－9　　平均粒径分布

反対に下流側にシフトしている。同じ現象は、著者ら[7]の一様砂を用いた河床形状の変動過程に関する実験にも見られている。

4.2 河床形状に及ぼす粒度分布の影響

平均粒径が同じで標準偏差の異なる材料を用いて、河床形状に及ぼす粒度分布の影響を数値解析によって調べる。その結果を図－10に示している。ここに、(a)は一様砂の場合(σ=1)、(b)は前節に述べたもの(σ=2.2)、(c)はかなり広い粒度分布を持つもの(σ=3.2)である。三者を比較してみると、標準偏差が大きいほど、深掘れの洗掘深が小さく、且つその位相が大きくなっていることが分かる。これは、混合砂の場合には洗掘部で粗粒化が起こり、粗粒成分が大きいほど、洗掘を抑制する効果が大きいからである。また、内岸の最大堆積厚(D_B)と外岸の最大洗掘深(D_S)の比については、一様砂(a)の場合においては、D_B/D_Sが1より小さいが、これに対し、混合砂の場合においては、1より大きくなっている。これは、混合砂の場合には細粒成分があって、これが横断方向へ輸送されやすいからである。



図－10　河床材料の粒度分布による河床形状の差異

5. 結　語

縦・横断勾配の影響を無視できない深掘れや砂州のような傾斜床面上における掃流砂量の算定方法を提示し、混合砂からなる蛇行流路における河床変動および粒度分布の予測に関する数値解析モデルを提案した。数値解析によって、蛇行流路における流砂のsortingプロセスの特性が明らかにされ、粗粒化による河床の洗掘への抑制効果があることが判明した。今後は、このシミュレーションモデルの改良および実河川への適用を図っていくつもりである。

【参考文献】

1　池田駿介・山坂昌成・千代田将明：混合砂礫床一様湾曲流路の平衡横断形状とSortingについて，土木学会論文報告集，第375号/Ⅱ-6,1986, pp. 151-160.

2) Parker, G. and E.D. Andrews: Sorting of Bed Load Sediment by Flow in Meander Bends, Water Resources Research, Vol. 21, No. 9, 1985, pp. 1361-1373.

3) 芦田和男・江頭進治・劉炳義・梅本正樹：蛇行流路におけるSorting現象および平衡河床形状に関する研究，京大防災年報，33号B-2, 1990, pp. 261-279.

4) 芦田和男・道上正規：混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究，京大防災年報,14号B,1971,259-273.

5) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Channel Bends, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 100, No. HY11, Proc. Paper 10963, Nov., 1974, pp. 1631-1648

6) Patankar, S.V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp., 1980.

7) 芦田和男・江頭進治・劉炳義・滝口将志：蛇行低水路を有する複断面流路における流れの特性と河床変動機構，京大防災年報，32号B-2, 1989, pp. 527-551.

8) 辻本哲郎・細川迭男：急勾配水路における礫の限界掃流力と流砂量，土木学会論文集第411号Ⅱ-12, 1989, pp.127-134.