

直線流路の交互砂州 Alternating Bars in a Straight Channel

東京工業大学工学部 正会員 福岡 捷二
東京工業大学大学院 学生会員 ○山坂 昌成

1. はじめに

沖積地河道でみられる交互砂州はその上の流れを蛇行させ、側岸の侵食および流路変動を引き起こす。このため、河道の平面形状を決めるには、交互砂州上の流れ、流砂および安定形状の理解が不可欠である。交互砂州河床は比較的大きな縦・横断勾配をもち、これが交互砂州上の流れおよび流砂運動を特徴づける。本研究は、交互砂州を念頭において縦・横断勾配をもつ境界面上の流れ、平衡流砂量および非平衡流砂量を解析的に求め、この結果を用いて交互砂州上の流砂量の空間分布と形状との関係を説明することを目的とする。

2. 縦・横断勾配をもつ境界面上の流砂量式の誘導

横断勾配をもつ斜面上の平衡流砂量式は平野¹⁾により導かれ、長谷川²⁾はこの解析を拡張して斜面上の非平衡流砂量の検討を行っている。これらの解析では、縦断勾配の影響がない等流状態を扱っている。交互砂州河床では、場所的に変化する縦・横断勾配をもつため、両者を考慮した流砂量式を導く必要がある。ここでは、水平床上的の流砂量式をもとに、砂粒子重量の斜面方向成分を考慮することによって比較的容易に縦・横断方向の平衡流砂量が求まることを示し、二次元の非平衡流砂量について検討する。

最初に平衡流砂量について述べる。平衡の本来の意味は流砂の出入りが釣り合って境界面の位置が時間的に変化しないことを示し、この状態は、同一水理条件（掃流力、縦・横断勾配など）をもつ空間が無限に広がっている場合のみ存在する。水理条件が場所的に変化する場合には流砂運動は非平衡となるが、考えている地点と同じ水理条件をもつ空間が無限に広がっている考えた場合の仮想の流砂量をその地点の平衡流砂量と呼ぶこととすると、平衡流砂量はその地点の水理条件だけで決定される。

図-1に縦・横断勾配をもつ平坦河床面の模式図を示す。x軸は縦断方向水平軸、y軸は横断方向水平軸、z軸は鉛直上向きを正とする軸である。

斜面とx-z平面との交線をs軸、斜面とy-z平面との交線をn軸とし、s-n平面内の最急勾配方向にp軸をとる。x軸とs軸のなす角度を θ_s 、y軸とn軸のなす角度を θ_n 、斜面の最急勾配角を θ_p で表わすと、平坦斜面の方程式は、

$$z = z_0 - x \tan \theta_s - y \tan \theta_n \quad \dots\dots(1)$$

で表わされる。s軸とp軸のなす角度を δ とおくと、x、yとs、n、pの関係は、

$$x = s \cos \theta_s = p \cos \delta \cos \theta_s \quad \dots\dots(2)$$

$$y = n \cos \theta_n = p \sin \delta \cos \theta_n \quad \dots\dots(3)$$

となる。このとき、 $\sin \theta_p = -\partial z / \partial p$ 、 $\partial(\sin \theta_p) / \partial \delta = 0$ なる関係式を用いると、最急勾配の大きさと方向は(4)式で表わされる。

以上の準備のもとに、図-1、2に示した縦・横断勾配をもつ斜面に流れのもつ縦断方向掃流力 τ_s 、横断方向掃流力 τ_n が作用している状態を考

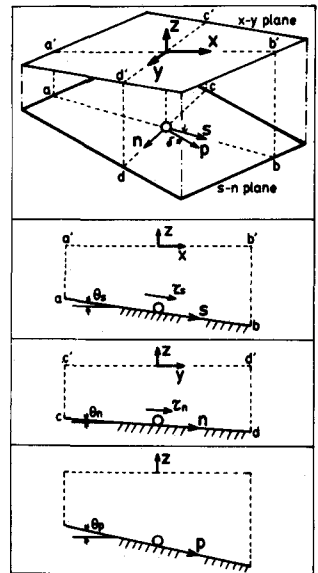


図-1 斜面の模式図

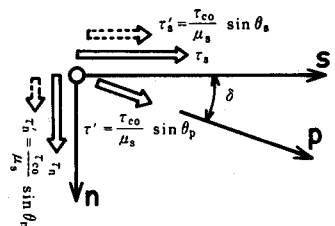


図-2 s-n平面上の掃流力

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta_p &= \sin \theta_s / \cos \delta \\ \tan \delta &= \sin \theta_n / \sin \theta_s \end{aligned} \right\} \dots\dots(4)$$

える。この斜面上の砂粒子には、 τ_s 、 τ_n のほか砂粒子重量の斜面方向成分が付加的な掃流力として作用する³⁾。1個の砂粒子に作用する重力の斜面方向成分は(5)式であり、(6)式が単位面積あたりを表わす。式中の ρ_s 、 ρ_0 はそれぞれ砂および水の密度、 d は砂の粒径、 α_1 、 α_2 は砂粒子の投影面積および体積に関する係数である。水平床上での砂の移動限界状態の釣り合いを考慮すると、水平床上の限界掃流力 τ_{co} は(7)式で表わされる。ここに μ_s は砂粒子の水中静止摩擦係数である。一方斜面上では、流れのもつ掃流力と砂粒子重量による付加的掃流力の和が(8)式に等しい状態が移動限界状態であり、この τ_c を斜面上の限界掃流力と呼ぶことにする。通常はこの状態にある流れのもつ掃流力を斜面上の限界掃流力と呼ぶが、ここで示すように水平床に変換して流砂運動を考える場合には、先のような扱いをする方が有用である。(6)、(7)

$$F = \alpha_2 d^3 (\rho_s - \rho_0) g \sin \theta_p \quad \dots\dots(5)$$

$$\tau' = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} (\rho_s - \rho_0) g d \sin \theta_p \quad \dots\dots(6)$$

$$\tau_{co} = \mu_s \frac{\alpha_2}{\alpha_1} (\rho_s - \rho_0) g d \quad \dots\dots(7)$$

$$\tau_c = \mu_s \frac{\alpha_2}{\alpha_1} (\rho_s - \rho_0) g d \cos \theta_p \quad \dots\dots(8)$$

$$\tau' = \frac{\tau_{co}}{\mu_s} \sin \theta_p \quad \dots\dots(9)$$

$$\tau'_s = \tau' \cos \delta = \frac{\tau_{co}}{\mu_s} \sin \theta_s \quad \dots\dots(10)$$

$$\tau'_n = \tau' \sin \delta = \frac{\tau_{co}}{\mu_s} \sin \theta_n \quad \dots\dots(11)$$

$$\tau_c = \tau_{co} \sqrt{1 - (\sin^2 \theta_s + \sin^2 \theta_n)} \quad \dots\dots(12)$$

式より、砂粒子に作用する付加的な掃流力 τ' は(9)式で表わされ、(4)式を用いてこれを s 、 n 方向に分解する。この結果、 s 方向の付加的な掃流力 τ'_s 、 n 方向の付加的な掃流力 τ'_n はそれぞれ(10)、(11)式となる。同様に(4)、(7)、(8)式より、斜面上の限界掃流力は(12)式となる。従って水平床上で考えると、砂粒子に作用する掃流力が図-2に示すように s 方向に $\tau_s + \tau_{co} \sin \theta_s / \mu_s$ 、 n 方向に $\tau_n + \tau_{co} \sin \theta_n / \mu_s$ で、限界掃流力が $\tau_{co} \sqrt{1 - (\sin^2 \theta_s + \sin^2 \theta_n)}$ である状態に等しいと考えることができる。いま、水平床上の平衡流砂量公式としてDu-Boysタイプ、すなわち $q_b / \sqrt{(\rho_s / \rho_0 - 1) g d^3} \propto \tau_* (\tau_* - \tau_{*c})$ を採用すると、全流砂量は、

$$q_{be} / \sqrt{(\rho_s / \rho_0 - 1) g d^3} = K \sqrt{(\tau_{*s} + \tau_{*co} \sin \theta_s / \mu_s)^2 + (\tau_{*n} + \tau_{*co} \sin \theta_n / \mu_s)^2} \times \sqrt{(\tau_{*s} + \tau_{*co} \sin \theta_s / \mu_s)^2 + (\tau_{*n} + \tau_{*co} \sin \theta_n / \mu_s)^2 - \tau_{*co}^2 [1 - (\sin^2 \theta_s + \sin^2 \theta_n)]} \quad \dots\dots(13)$$

で与えられる。ここに τ_* は無次元掃流力 $\tau / \{(\rho_s - \rho_0) g d\}$ を意味し、添字の e は平衡状態を意味する。平衡状態の流砂運動では、1個の砂粒子に注目すると定常運動をしているため、砂粒子に作用する底面の抵抗と合掃流力(付加的な掃流力も含む)は釣り合っている。さらに、砂粒子の移動方向と底面抵抗の作用の方向が逆であることより、砂粒子の移動方向および流砂量ベクトルの方向は掃流力ベクトルの方向に一致することになる。このとき、全流砂量を各成分に分解すると、縦断方向の平衡流砂量 q_{bes} 、横断方向の平衡流砂量 q_{ben} がそれぞれ次式のように得られる。

$$q_{bes} / \sqrt{(\rho_s / \rho_0 - 1) g d^3} = K (\tau_{*s} + \tau_{*co} \sin \theta_s / \mu_s) \times \sqrt{(\tau_{*s} + \tau_{*co} \sin \theta_s / \mu_s)^2 + (\tau_{*n} + \tau_{*co} \sin \theta_n / \mu_s)^2 - \tau_{*co}^2 [1 - (\sin^2 \theta_s + \sin^2 \theta_n)]} \quad \dots\dots(14)$$

$$q_{ben} / \sqrt{(\rho_s / \rho_0 - 1) g d^3} = K (\tau_{*n} + \tau_{*co} \sin \theta_n / \mu_s) \times \sqrt{(\tau_{*s} + \tau_{*co} \sin \theta_s / \mu_s)^2 + (\tau_{*n} + \tau_{*co} \sin \theta_n / \mu_s)^2 - \tau_{*co}^2 [1 - (\sin^2 \theta_s + \sin^2 \theta_n)]} \quad \dots\dots(15)$$

$\tau_{*n} = 0$ 、 $\theta_n = 0$ のとき、横断方向平衡流砂量は、

$$\frac{q_{ben}}{\sqrt{(\rho_s / \rho_0 - 1) g d^3}} \cdot \frac{1}{\sin \theta_n} = K \frac{\tau_{*co}^2}{\mu_s} \left\{ \sqrt{\left(\frac{\tau_{*s}}{\tau_{*co}} \right)^2 + \left(\frac{\sin \theta_n}{\mu_s} \right)^2} - \cos \theta_n \right\} \quad \dots\dots(16)$$

となり、この式は θ_n が小さいとき、平野¹⁾が導いた横断方向流砂量式

$$\frac{q_{ben}}{\sqrt{(\rho_s / \rho_0 - 1) g d^3}} \cdot \frac{1}{\tan \theta_n} = K' \frac{\tau_{*co}^{m+0.5}}{\mu'} \left(\frac{\tau_{*s}}{\tau_{*co}} - 1 \right)^m, \quad [m = 1] \quad \dots\dots(17)$$

にほぼ一致する。図-3は、回転型風洞を用いて行なった池田^{4),5)}の実験結果と(16)式との関係を示したもので

ある。①印は粒径 0.26mm, ○印は粒径 0.42mm の砂を用いた実験値である。実験値は掃流力の比較的小さなところまでほぼ 1 本の直線にのり、(16) 式は横断勾配角の広い範囲にわたって、斜面上横断流砂量の実験結果を良く説明していると言える。またこの実験結果では比例定数 K は約 70 となる。

ここまでの解析で得られた流砂量は平衡時の流砂量であり、ある地点の水理条件によって一義的に決定されるものである。しかし、一般に斜面を流れる流砂は境界条件や場所的な水理条件の変化、すなわち流砂の運動履歴の影響を受けるため、非平衡状態で流れることになる。

次に斜面上の二次元非平衡流砂量について検討する。図-4 の破線で示すように水理条件が場所的に変化せず、その結果平衡流砂量ベクトルが斜面沿いに一定である場合の砂移動を考える。この場合には非平衡性は上流側の境界条件の影響により生じる。ある地点 (s_0, n_0) を通過する流砂量が平衡流砂量に等しくないとき、砂粒子は流れのもつ掃流力や重力の作用を受けて加速、あるいは減速しながら流下し、平衡流砂量に徐々に近づいてゆく。そこで、砂粒子が単位距離流下する間の流砂量の変化が、平衡流砂量と実際に流れている流砂量の差に比例すると仮定する。比例定数を κ_B とすると、砂粒子の軌跡に沿って次式が成り立つ。

$$\lim_{\Delta s, \Delta n \rightarrow 0} \left[\frac{q_{Bs}(s+\Delta s, n+\Delta n) - q_{Bs}(s, n)}{\sqrt{(\Delta s)^2 + (\Delta n)^2}} \right] \frac{\Delta n}{\Delta s} = \frac{q_{Bn}}{q_{Bs}} = \kappa_B (q_{Bes} - q_{Bs}) \quad \dots\dots (18)$$

$$\lim_{\Delta s, \Delta n \rightarrow 0} \left[\frac{q_{Bn}(s+\Delta s, n+\Delta n) - q_{Bn}(s, n)}{\sqrt{(\Delta s)^2 + (\Delta n)^2}} \right] \frac{\Delta n}{\Delta s} = \frac{q_{Bn}}{q_{Bs}} = \kappa_B (q_{Ben} - q_{Bn}) \quad \dots\dots (19)$$

比例定数 κ_B は [1/長さ] の次元をもち、砂粒子の平均移動距離の逆数に相当する。砂粒子の移動方向と流砂量ベクトルの方向が一致することを考慮して上式の左辺を展開することにより、平衡流砂量と非平衡流砂量の関係式が次のように得られる。

$$\frac{\partial q_{Bs}}{\partial s} \frac{q_{Bs}}{\sqrt{q_{Bs}^2 + q_{Bn}^2}} + \frac{\partial q_{Bs}}{\partial n} \frac{q_{Bn}}{\sqrt{q_{Bs}^2 + q_{Bn}^2}} = \kappa_B (q_{Bes} - q_{Bs}) \quad \dots\dots (20)$$

$$\frac{\partial q_{Bn}}{\partial s} \frac{q_{Bs}}{\sqrt{q_{Bs}^2 + q_{Bn}^2}} + \frac{\partial q_{Bn}}{\partial n} \frac{q_{Bn}}{\sqrt{q_{Bs}^2 + q_{Bn}^2}} = \kappa_B (q_{Ben} - q_{Bn}) \quad \dots\dots (21)$$

ここでは平衡流砂量のベクトルが場所的に変化しない状態を想定して (20), (21) 式を導いたが、平衡流砂量のベクトルが場所的に変化する場合にも、 κ_B が場所の関数として (20), (21) 式が成立すると考えて良い。

3. 交互砂州上の流れと流砂量

前節で得られた解析結果を用いて、交互砂州上の砂移動について検討する。前節では流砂量を河床上の掃流力および河床の縦・横断勾配と関連

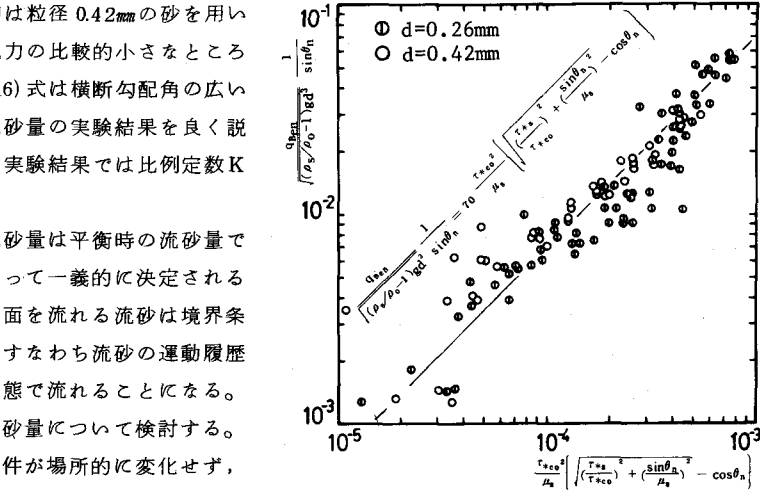


図-3 横断方向流砂量

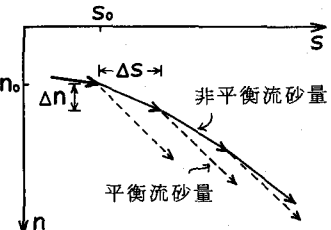


図-4 平衡流砂量と非平衡流砂量

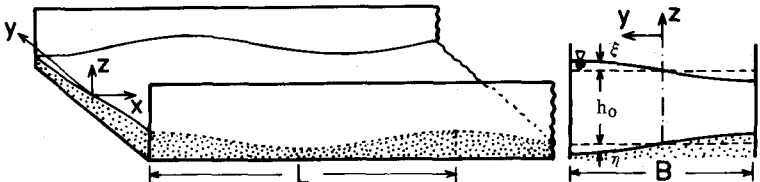


図-5 記号の定義

づけて論じてきた。河床の掃流力はその上の流れと密接な関係にあるため、まず交互砂州上の流れを明らかにする必要がある。

交互砂州を形成する流れは、川幅に比して水深が十分小さな流れであるため、平面二次元流とみなせる。主流方向の流速 u を平均流速 u_0 とそれからの変動量 u' とに分割する。水深変動量 $(\xi+\eta)/h_0$ 、横断方向流速 v/u_0 が u'/u_0 と同じオーダーの微小量であるとき、線形化された流れの運動方程式、連続式は、それぞれ (22)～(24) 式で表わされる。式中の f' は河床と流体間の摩擦係数である。平均流速 u_0 、平均水深 h_0 、平均河床勾配 i_0 との間には (25) 式の関係が成り立つ。

交互砂州の縦・横断形状として、従来の解析⁶⁾と同様に (26) 式のような正弦波形状を与え、河床形状、横断方向流速の境界条件を考慮して流速解を (27)～(29) 式のように表わす。 (26)～(29) 式を流れの支配方程式 (22)～(24) に代入すると $A \sim F$ は次の連立方程式の解で与えられる。

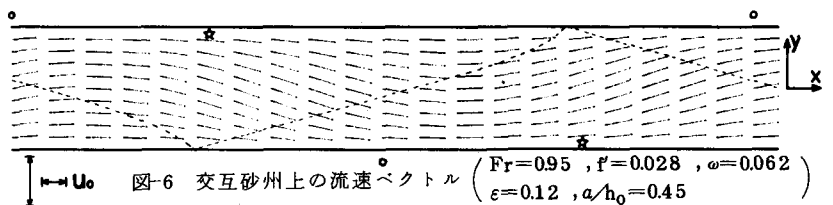
$$\begin{bmatrix} \omega & -f' & 0 & 0 & \omega/F_r^2 & f'/2 \\ f' & \omega & 0 & 0 & -f'/2 & \omega/F_r^2 \\ 0 & 0 & \omega & -f'/2 & 0 & -\pi\epsilon/(2F_r^2) \\ 0 & 0 & f'/2 & \omega & \pi\epsilon/(2F_r^2) & 0 \\ \omega & 0 & 0 & \pi\epsilon/2 & \omega & 0 \\ 0 & \omega & -\pi\epsilon/2 & 0 & 0 & \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f'/2 (a/h_0) \sin \phi \\ f'/2 (a/h_0) \cos \phi \\ 0 \\ 0 \\ -\omega (a/h_0) \cos \phi \\ -\omega (a/h_0) \sin \phi \end{bmatrix} \quad \dots (30)$$

ここに、 $\omega = 2\pi h_0/L$ 、 $F_r^2 = u_0^2/(gh_0)$ 、 $\epsilon = h_0/(B/2)$ である。 $A \sim F$ の解の形は複雑であるので省略し、ここでは簡単のために次の形で表わす。

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{a}{h_0} (A_1 \cos \phi + A_2 \sin \phi), \quad B = \frac{a}{h_0} (B_1 \cos \phi + B_2 \sin \phi), \quad C = \frac{a}{h_0} (C_1 \cos \phi + C_2 \sin \phi) \\ D &= \frac{a}{h_0} (D_1 \cos \phi + D_2 \sin \phi), \quad E = \frac{a}{h_0} (E_1 \cos \phi + E_2 \sin \phi), \quad F = \frac{a}{h_0} (F_1 \cos \phi + F_2 \sin \phi) \end{aligned} \right\} \quad \dots (31)$$

このとき、 $A_2 = -B_1$ 、 $B_2 = A_1$ 、 $C_2 = -D_1$ 、 $D_2 = C_1$ 、 $E_2 = -F_1$ 、 $F_2 = E_1$ の関係がある。

図-6 は著者ら⁷⁾の実験データを用いて、上記の方法により計算された交互砂州上の流速ベクトル図である。図中の○印の位置を最深



点に一致させ、ベクトル図を描いた。横断方向流速は縦断方向流速の2倍に拡大して描かれている。破線は砂州先端位置より約 $1/4$ 波長上流の対岸に最深点が位置する⁷⁾という実測の砂州平面形状と対応させて描いた交互砂州の前縁線である。流れは左右交互の最深部のやや下流点を連ねるような形で蛇行していることがわかる。水面はほぼ平坦であり、水深の場所的な変化は河床高さの差によって生じている。

次に河床の掃流力を流れと関連づけて、交互砂州上の平衡流砂量と非平衡流砂量を算定する。ある地点の掃流力はその地点の鉛直方向に平均化された流速の2乗に比例するものとし、さらに掃流力ベクトルの方向は流速ベクトルの方向に一致するものとする。このとき無次元化された掃流力の縦断方向成分、横断方向成分はそれぞれ(32),(33)式で表現される。ここに τ_{*0} は流れのもつ平均的な無次元掃流力であり、(34)式で示される。(14),(15)式に示した底面に沿った掃流力 τ_{*s}, τ_{*n} をそれぞれ τ_{*x}, τ_{*y} で近似し、これらの関係式を(14),(15)式に代入すると交互砂州上の平衡流砂量の空間分布が得られる。

$$\tau_{*x} = \tau_{*0} \sqrt{\left(1 + \frac{u'}{u_0}\right)^2 + v^2} \left(1 + \frac{u'}{u_0}\right) \quad \dots\dots (32)$$

$$\tau_{*y} = \tau_{*0} \sqrt{\left(1 + \frac{u'}{u_0}\right)^2 + v^2} v \quad \dots\dots (33)$$

$$\tau_{*0} = f' u_0^2 / \{2(\rho_s/\rho_0 - 1)gd\} \quad \dots\dots (34)$$

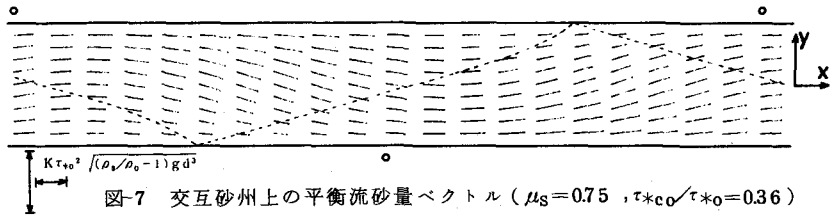
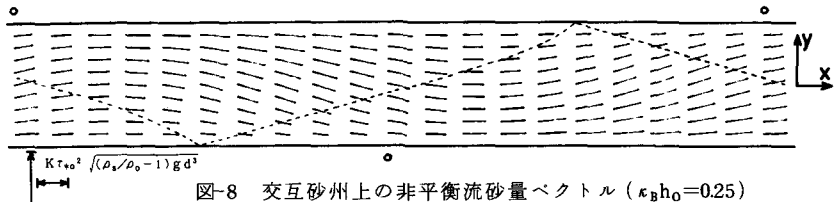


図-7に、図-6と同じ水理条件で計算した平衡流砂量のベクトル図を示す。この計算条件では、河床の縦・横断勾配の影響は小さく、流速ベクトルの方向と平衡流砂量のベクトルの方向はほとんど一致する。しかし、河床の掃流力は流速の2乗に、流砂量はほぼ流速の4乗に比例するため、流砂量の場所的な変化は流速のそれに比べ顕著となっている。

図-8は上で得られた平衡流砂量をもとに、(18),(19)式より算出した非平衡流砂量のベクトル図である。非平衡



性を示す係数 κ_B は $\kappa_B h_0 = 0.25$ で与えた。これは、砂粒子の平均移動距離が水深の4倍程度であることに相当する。境界条件として $x=0$ でその地点の水理条件に対応する平衡流砂量を与え、流砂量ベクトルに沿って、すなわち $dn = (q_{Bn}/q_{Bs})ds$ を満足させながら(18),(19)式の差分計算をすることにより、非平衡流砂量を求めた。図-7と図-8を比較すると、非平衡流砂量は平衡流砂量より位相が遅れることがわかる。しかし、本計算条件のように $2\pi h_0/L \ll \kappa_B h_0$ の場合には、従来の一次元流砂量の解析結果⁸⁾と同様に位相遅れはほとんどなく、非平衡流砂量はほぼ平衡流砂量で近似できる。一般に、交互砂州の波長は砂粒子の平均移動距離に比して十分大きいので、交互砂州上の砂移動に及ぼす非平衡性の影響は小さいと考えられる。また上の計算条件では境界条件が流砂量に及ぼす影響は、一波長流下しない間にほとんど消失する。図-8に示した流砂量分布は、実測の交互砂州上の流砂量分布をよく表現している。すなわち、各横断面に注目してみると、縦断方向の流砂量は河床高の高いところで大きく、縦断方向流砂量と流砂量ベクトルの偏角は砂州の前縁付近で大きくなる⁷⁾。

流砂量が場所的に変化するということは、河床で場所的な侵食・堆積が生じていることを意味する。河床高さの時間的な変化と流砂量の場所的な変化は流砂の連続式(35)に関連づけられる。 λ は砂の空けき率である。先に計算された非平衡流砂量を用いて(35)式より算出した単位時間あたりの河床高さの変化を図-9に示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) \quad \dots\dots (35)$$

$$E = \eta/h_0 \quad \dots\dots (36)$$

$$T = \frac{K \tau_{*0}^2 \sqrt{(\rho_s/\rho_0 - 1)gd^3}}{(1-\lambda)Lh_0} t \quad \dots\dots (37)$$

河床高さおよび時間を(36),(37)式のように無次元化した。破線の左岸は侵食を、破線の右側は堆積を意味する。初期の河床形状は(26)式であり、横断方向に正弦波形であったにもかかわらず、横断面内で見た単位時間あたりの河床高さの変化は、流路の中心に対して点対称の形にはならない。堆積領域側で場所的になだらかな変化を示し堆積速度が平均化されているのに対して、侵食領域側では場所的な変化が大きく、側岸付近

で浸食速度が著く大きくなっていることがわかる。このため ΔT の時間が経過した後の河床形状は、

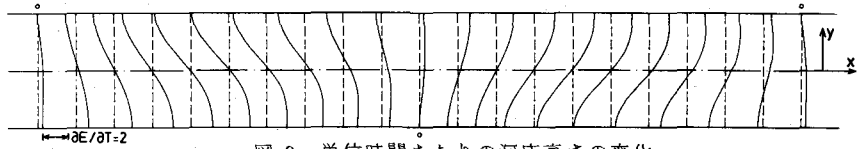


図-9 単位時間あたりの河床高さの変化

正弦波形状から次第にずれてくることになる。さらに注目すべき点は、流路中央部では全体的に堆積傾向が現われていることである。このことを明確に示すため 各断面の堆積速度を縦断的に一波長平均すると図-10のようになる。側岸付近では平均的に浸食傾向にあり、この部分で浸食された砂が流路中央部に堆積していることがわかる。交互砂州河床では、縦断方向に平均化された河床高さは流路中央部が盛り上がったかまぼこ型になる^{9),10)}。ここで計算された縦断方向平均の堆積速度が、このようにかまぼこ型の傾向を示すことは重要である。この現象は次のように交互砂州上の流れの特性から説明できる。(厳密には流れの特性よりも流砂量の分布から説明するのが適切であるが、先に示したように交互砂州上の流砂量は平衡流砂量にほぼ等しいことからこのような議論が可能である。)図-6の交互砂州上の流速ベクトル図に主流流速が最大である位置を☆印で示す。主流流速最大位置を中心として上・下流 $L/4$ 離れた位置までの領域を考えると、流路中心線を境として☆印のある側では主流流速が平均流速より大きくなり、他の側では主流流速が平均流速より小さくなる。流速ベクトルの分布を見ると、おおむね流速の大きな領域で流路中央向き、流速の小さな領域で側岸向きとなっている。河床の横断勾配があまり影響しないうちは、全流砂量は主流流速に支配され、流砂量ベクトルの方向は流速ベクトルの方向にほぼ一致する。このため、交互砂州上の流速分布より、側岸方向への砂輸送量に比し、流路中央方向への砂輸送量が大きくなり、流路中央部が盛り上がることになる。河床横断勾配の影響が流砂量に大きく現われるほど中央部の盛り上がりが顕著になると、流路中央向きの流砂量は減じ、逆に側岸向きの流砂量が増すため、砂の横断方向輸送量がバランスしてかまぼこ形状の発達をやみ、平衡状態に達すると考えられる。平衡状態に達したときの交互砂州の波高については藤田、村本ら¹¹⁾が解析を試みている。

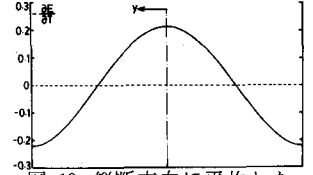


図-10 縦断方向に平均した堆積速度

4. まとめ

縦・横断勾配をもつ河床上の平衡流砂量は、砂粒子重量の斜面方向成分を付加的な掃流力として考慮することによって比較的容易に得られ、実験値との対応も良い。水理条件が場所的に変化する場合は、流砂量を支配する境界付近では、流砂は非平衡状態で流れる。この非平衡流砂量と平衡流砂量の関係を定式化した。これらをもとに交互砂州上の流砂量分布を理論的に求め、実験で求められている流砂量の空間分布特性をよく説明することを示した。さらに交互砂州河床では、平均的に流路の中央部が盛り上がる傾向にあることを理論的に明らかにした。

本研究は昭和57年度文部省科学研究費、一般研究(C)(研究代表者：福岡捷二)の補助を受けて行った。記して謝意を表します。

〔参考文献〕 1)平野：振幅を伴う流路変動について，論文報告集，第210号。 2)長谷川：非平衡性を考慮した側岸侵食量式に関する研究，論文報告集，第316号。 3)山坂・福岡：交互砂州，交互洗堀をともなう蛇行の理論，第37回年講。 4)池田・宮下：斜面における砂の移動について，第25回水講。 5) Ikeda：Lateral Bed Load Transport on Side Slope，増大研究報告，第11巻。 6)林：河川蛇行の成因についての研究，論文報告集，第180号。 7)福岡・内島・山坂・早川：交互砂州上の流砂量分布，第27回水講。 8)福岡・山坂：側岸の侵食・堆積による蛇行発達の理論，論文報告集，第327号。 9)藤田：沖積河川の流路変動に関する基礎的研究，京大・学位論文，1980。 10)長谷川・山岡：発達した交互砂州の性状に関する実験と解析，第26回水講。 11)藤田・村本・堀池・小池：交互砂州の発達機構，第26回水講。