

東北大学工学部 正員 ○三王英寿
 ” ” 坂本竜雄

1. 序

低フルード数領域の移動床に生ずる小規模河床形態として砂漣と砂堆とがあり。河川においてこれらの形成に対する予測を行なうことは工学的に意義がある。そのためにはおのおのの河床形態の形成機構について明らかにされることが重要であるが、とくに砂漣に関しては不明確な点が多い。本文は、二次元水路によって行なわれた基礎的実験結果に基づいて砂漣の発生と崩壊について考察し、砂漣と砂堆との区分を明らかにするとともに野外観測結果を加えて河川における予測法についてふれたものである。

2 砂漣に関する実験

砂漣と砂堆とが発生機構的に異なると考える立場においては、移動境界面近傍の現象が砂漣の発生に対して支配的であり、水流中の比較的規模の大きな乱れが砂堆の発生と関連するとみなされる点が共通し、次元解析的に求められた砂漣レイノルズ数 ($Re_{\delta_*} = U_* \delta_* / \nu$) が指標としてある程度役立っている。ここでは、現象的により詳細な考察を行なう目的で、各種粒度の砂を用い、温度によって水の動粘性係数 ν を変化した場合の砂漣の発生および掃流力の変化に伴う遷移・崩壊に関する実験を行なった。実験装置については、文献(1)に記されている。

1) 砂漣の発生に関する実験においては、比重 $r=2.66$ の川砂を選級した粒径 $d=0.30 \sim 0.42$ および $d=0.42 \sim 0.59$ mm の底質が用いられた。実験範囲は、水温 $0^\circ \sim 40^\circ \text{C}$ 、 $\nu=0.0179 \sim 0.0066 \text{ cm}^2/\text{s}$ である。

水温(動粘性係数 ν) を主変量として何回か実験を行なったのち、次のような結果がえられた。a) 高温(ν が小) になるにつれて流砂量が増加する。これは、Francis や Taylor・Vanoni の実験結果と一致する。b) 低温(ν が大) で流砂が少量であるとき、 Re および無次元掃流力 ($\tau_* = U_*^2 / \{ (\rho_s / \rho - 1) g d \}$) が常温における発生領域にあっても、砂漣の発生をみない場合がある。図-1 中の x 印。c) 水温(ν 、流砂量) は、砂漣発生時の時間的増幅率に影響する。d) 砂漣の発生位置が、かなり規則的に変化する。このことと境界層の乱流遷移との関連について検討したものが図-2 である。同図中の描点は底砂面前縁から砂漣発生点までの距離を x とした実測値、破線は平板上の境界層の乱流遷移レイノルズ数 Re_{δ_*} を 450 とした場合の関係(1)、(2) 式から求めたものである。同図中の破線の右側部分が乱流領域に相当するものであり、乱流遷移直後で砂漣が発生していることが推測される。

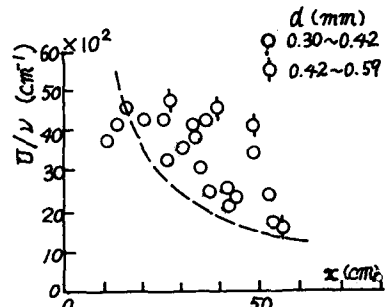
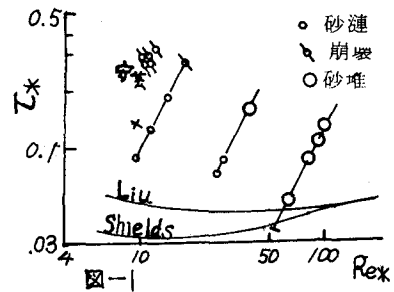


図-2 砂漣発生点と境界層遷移

$$Re_{\delta_*} = (U \delta_* / \nu)_c = 450 \quad \text{----- (1)} \quad \delta_* = 1.7208 \sqrt{\nu x / U} \quad \text{----- (2)}$$

ここに x : 平板前縁からの距離, δ_* : 境界層排除厚, U : 境界層外縁流速

2) 前実験と同一の川砂を選級した粒径 $d=0.3 \sim 0.6$, $0.6 \sim 1.2$, $1.2 \sim 2.5$, $2.5 \sim 5.0$ mm の各種底質に対して、勾配および流量により掃流力を変化させ、発生する河床形態について検討した。その実験結果の一部が図-1 に示されており、次のようなことがいえる。a) 砂漣の発生に対する砂の粒径の上限が、 $d=0.6 \sim 1.2$ mm の範囲にある。b) 砂漣の崩壊に対する限界が掃流力 τ_* によって示され、今

回の実験範囲からはその限界値として0.2~0.3がえられた。これは、安芸の実験結果から推算した値(図-1)や芦田・奈良井による実験結果に比較的近い。

3 砂漣の形成機構に関する考察

前記のような実験結果から、境界層の乱流遷移が一種の外乱として作用していると仮定すれば、砂漣の発生は境界面近傍に生じた比較的小粒径の砂粒を含む移動層に何らかのかく乱が加えられた場合に相当すると考えられる。これに類似するモデルとしてLongの研究がある。すなわち、鉛直方向に密度勾配のある流れの底の突起の背後に生ずる波動性に関して、Navier-Stokesの式から出発して流線変位 δ について偏微分方程式(3)を導き、さらに(4)と(5)の仮定によってHelmholtz形の方程式(6)がえられている。

$$\nabla^2 \delta + \frac{1}{2} \{ (\nabla \delta)^2 + 2 (\partial \delta / \partial y) \} \partial / \partial y [\rho_n (g \sigma^2)] + (g / g \sigma^2) (\partial g / \partial y) \delta = 0 \quad \text{----- (3)}$$

$$g \sigma^2 = \text{const} \quad \text{----- (4)} \quad (g / g \sigma^2) |\partial g / \partial y| = R^2 = \text{const} \quad \text{----- (5)}$$

$$\nabla^2 \delta + R^2 \delta = 0 \quad \text{----- (6)} \quad \text{ここに } \delta: \text{かく乱状態からの流線のy方向変位}$$

ここで、領域 $0 \leq x \leq a$, $0 \leq y \leq b$ において、(7)のような原点近傍に流線変位の形でかく乱を与える条件のもとに(6)式をとくと(8)式のような解が求まる。これは流線のx方向における空間的波動性を示すもので、移動床近傍にこのような波動があればそれに伴う局所的流砂量変化によって河床が変形し、さらにその変形が下流に対してかく乱源として作用することによってつぎつぎに砂漣が形成されることが考えられる。この場合、波動の規模を決定する支配的要素は R の値であり、(5)式から密度の鉛直分布したがって移動床近傍の流砂量が問題になることが理解される。

$$\left. \begin{aligned} \delta = 0; & (x=0, 0 \leq y \leq b), (x=a, 0 \leq y \leq b), (0 \leq x \leq a, y=b) \\ \delta = R(x); & (0 \leq x \leq a, y=0), \quad R(x) = \begin{cases} \alpha & 0 \leq x \leq \varepsilon \\ 0 & \varepsilon < x \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (7)}$$

$$\delta(x, y) = \frac{2}{a} \left[\sum_{n=1}^N \frac{\sin \frac{n\pi x}{a} \sin \{R(b-y)\}}{\sin(Rb)} \int_0^a R(\xi) \sin \frac{n\pi \xi}{a} d\xi + \sum_{n=N+1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x}{a} \sinh \{R_2(b-y)\}}{\sinh(R_2 b)} \int_0^a R(\xi) \sin \frac{n\pi \xi}{a} d\xi \right] \quad \text{--- (8)}$$

$$\text{ここに } R_1 = \sqrt{R^2 - (n\pi/a)^2}, \quad R_2 = \sqrt{(n\pi/a)^2 - R^2}$$

4 形成領域の予測

河川において比較的入手し易いデータによって砂漣と砂堆との形成領域を予測する方法として、勾配 I を助変数とし、水深 H と河床材粒径 d を両座標軸にとった平面を考える。砂漣の発生に必要な掃流力を τ_{k1} とし、その崩壊を呈する掃流力を τ_{k2} とすれば、 $d \leq 0.6 \sim 1.2$ で $\tau_{k1} < \tau_* < \tau_{k2}$ の部分が砂漣領域であり、低フルード数で $\tau_{k1} < \tau_*$ の残部が砂堆領域とみなされる。ここで τ_{k1} は、前記考察のように、流砂量に関連すると考えられる。図-3に一例を示す。同図中の砂漣は安芸の実験値、砂堆は鳴瀬川中流部における実測値である。

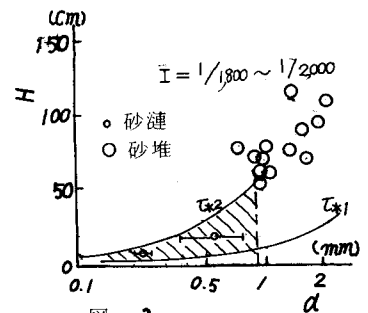


図-3

5 結 語

底質移動層の波動性による砂漣の発生を考え、さらに掃流力 τ_* による崩壊に対する限界値を検討し、砂堆領域から砂漣領域を区分する基準をえた。大小広範な分布を呈す低フルード数領域における河床波の予測に多少の手がかりを与えられると思われる。

文 献：1) 坂本・三王：第16回水理講演会講演集 (2) Franco, J.J.: Proc. A.S.C.E., WW3, /968 3) Taylor, B.D. and V.A. Vanoni: Proc. A.S.C.E., HY8, /972 4) Long, R.R.: Tellus, 5~7, /953~1955 5) 安芸統一：河相論 6) 芦田和男・奈良井修二：京都大学防災研年報, /2~/3, /969~1970