

京都大学工学部 正員 辻本 哲郎
 (株)清水建設 正員 竹東 正孝
 日本水道コンサルタント 正員 和田 芳樹

1. まえがき 従来多くの河床技のスケールや抵抗を予測する式は水深等の本来未知パラメータであるべき量を含んでおり、原理的に考えると予測式として充分なものと言えない。これは実際問題としては外部条件である流量が未知で、むしろ水深が実際等で知られている場合が多いことを考えるとこの形式の方が使いよいことに原因しているのだが、例えばある対象とする移動床水路(一様直線とし、河床材料、勾配が既知とする)に、計画又は設計流量が流れたとき、河床形態がどうなり、流れの状況がどうなるかということを知りたい状況もよくあるし、また、最近では単に流水の疎通のみならず土砂災害の対策も含めて河道を存えねばならない状況である。さらに、最近では、河床形状が流量履歴に大きく依存していることが注目されるようになり、流量変化に対する河床形状の応答、さらにそれに伴う流水(抵抗)の応答も移動床水理の主要なテーマとして研究されるようになると、外部条件¹⁾(流量、勾配、河床材料)に対し、少なくとも平穩状態²⁾という状況になるのかを予測できるか否かは重要である。本研究では、外部条件を表す下記の3つの無次元パラメータ³⁾だけから河床技の種類、スケール、流量、流れの状況(抵抗)を予測することを検討した。なお本報ではdunesに限って説明する。

$$q_* \equiv q / \sqrt{(g/p-1)} g d^3; \quad I_* \equiv I / (g/p-1); \quad d_* \equiv g d^3 / \nu^2$$

(q :単位幅流量, p :砂の比重, d :粒径, g :重力加速度, I :路床勾配($\approx$ エネルギー勾配), ν :動粘性係数)

2. dunesのスケールと抵抗則 一般にdunesについて平均波長は $L = R_L \cdot R$ (R :水深, $R_L \approx 5.0$ ²⁾) が良く適合すると言われる。一方、三角形勾配 θ は無次元掃流力 τ_* に対しある値までは増加し、それ以上の τ_* に対しては減衰、ついには消滅する。これをうまく表示する式は現状²⁾は見当たらないが、比較的特性を良く表すFredse式³⁾をもとに実験資料の検討から次式を使う。

$$\theta = \theta_{FR}(\tau_*, \tau_{*E}) \cdot g(\tau_*, \tau_{*E}) \quad \cdots (1) \quad (\theta_{FR} \text{ は Fredse 式})$$

$$\theta_{FR} = 0.119 \{1 - (\tau_{*E}/\tau_*) - 0.4 \tau_{*E}\}^2; \quad g(\tau_*, \tau_{*E}) = \{1 - (\tau_*/\tau_{*E})^3\}^{1/3} \quad \cdots (2)$$

ここで、 τ_{*E} は dunes が消滅するときの τ_* の値で、次のように領域区分図より与えることとした。すなわち、いわゆる transition は dunes の減衰領域の一部と考え、upper regime の下限(dunes の上限)を図-1のように決めた。図の実線²⁾で示される境界線は $q_* = 0.184 I_*^{-1.73}$ であり、この境界線上では平坦河床の抵抗則が成立することから、 $\tau_{*E} = 0.107 I_*^{-0.24} \cdots (3)$ を得た。式(1)~(3)による $\theta \sim \tau_*$ の関係は図-2に示され、概ね実験値と良く適合している。

さて、dune bed上の流れについて、dunesの形状パラメータを陽に含んだ抵抗則の代表例としては次式で表わされるYalin式⁴⁾がある。

$$C/\sqrt{g} = (C/\sqrt{g})_F / \sqrt{1 - \theta \{ \cot \phi - (R_L \theta / 2) (C/\sqrt{g})_F \}} \quad \cdots (4)$$

ここに C : Chézy係数, ϕ : 砂の安息角, 添字 F は平坦河床での値を示す。一方、Chézy係数の定義より、 $C/\sqrt{g} = U/\sqrt{g h I} = q_* I_* / (R/d) I_*^{1/2} \cdots (5)$ であり(U : 平均流速), 式(4),(5)を等置すると、 R/d について解け、

$$R/d = f_d(q_* I_*, I_*) \quad \cdots (6) \text{ と水深が外部パラメータのみで表わ}$$

される。これより移動床流れの状況を表わす各量がすべて、次のよう(1)に、外部パラメータのみで表わされることになる。すなわち、

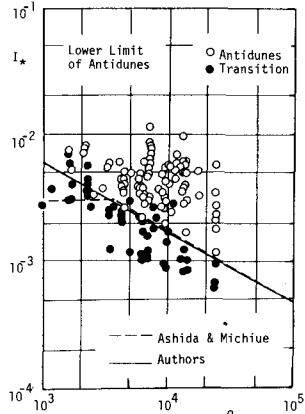


図-1 upper regime の下限

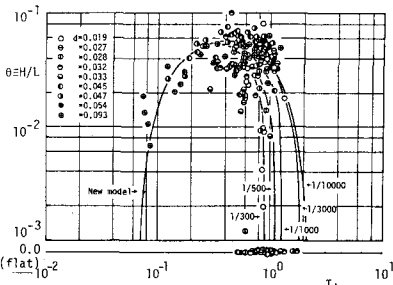


図-2 $\theta \sim \tau_*$

$$L/d = k_L \cdot f_R, \quad \tau_* = I_* \cdot f_R, \quad \theta = \text{func}(I_*, f_R) \equiv f_\theta(\beta_* I_*, I_*), \quad H/d = k_L \cdot f_\theta \cdot f_R, \quad C/\sqrt{g} = \beta_* I_* (I_* \cdot f_R)^{3/2}$$

$$Fr = \beta_* \sqrt{0.1 - 1} \cdot f_R^{-3/2}, \quad Re_* = \{ (0.1 - 1) \cdot I_* \cdot d_* \cdot f_R \}^{1/2} \quad (Fr = U/\sqrt{gH}, Re_* = U_* d/V, U_*: \text{摩擦速度})$$

ところで、上式はすべて dunes に対するもので、式(3)で上限は押えてあるものの下限として ripples との境界を明らかにしておく必要がある。慣例的に $Re_* = 10$ または 20 としてその境界を $d_* \sim \beta_* I_*^{(1)}$ に示すと、図-3の実線のようになり、実験資料から予測したものとほぼ一致し、また前報¹⁾に示したような $d_* \sim \beta_* I_*$ で「ほぼ」意的に dunes と ripples を区分できるものと考えられる。上記で予測された移動床の状態を表す各パラメータと $\beta_* I_*$ の関係 (I_* をパラメータとしている) について 実験資料と比較したものが図-4 ~ 8 である。実験資料としては U.S.G.S. のもの²⁾を用いた。とくに図-8 によると実験水路の場合 ($I = 1/500$ 程度) では Froude 数が「1 程度」で upper regime へ移行するが、平野部実河川 ($I = 1/3000$ 程度) では、 $Fr = 0.4 \sim 0.5$ と比較的小さい場合にも upper regime になっていることが示されており、今後洪水時の実河川データを含む検討を行ってみたいと考える。

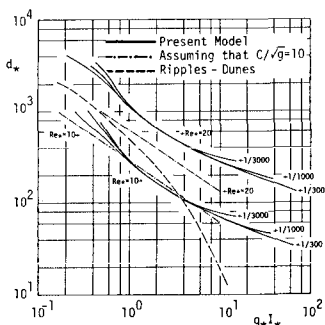


図-3 dunes と ripples の境界

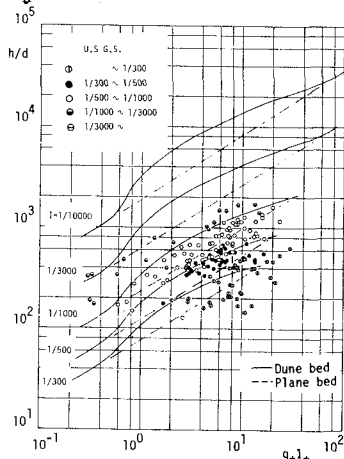


図-4 $h/d \sim \beta_* I_*$

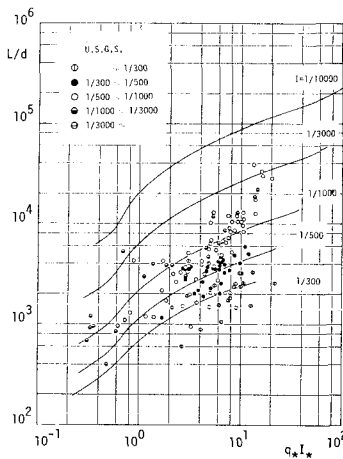


図-5 $L/d \sim \beta_* I_*$

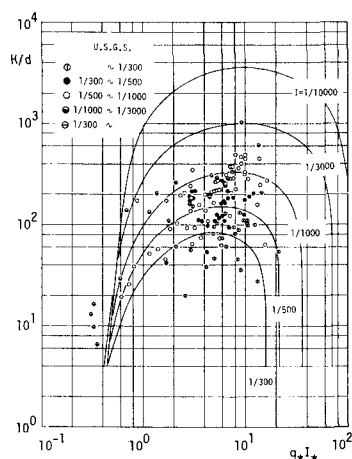


図-6 $H/d \sim \beta_* I_*$

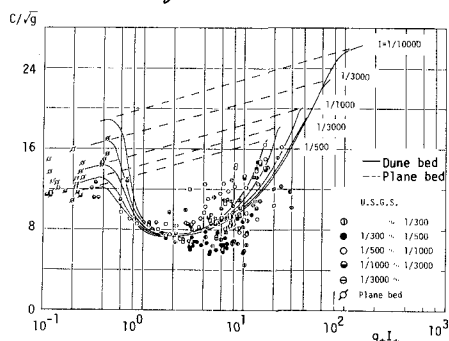


図-7 $C/\sqrt{g} \sim \beta_* I_*$

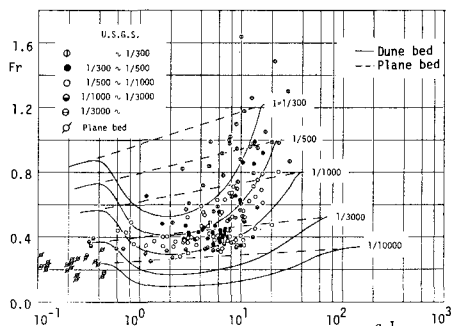


図-8 $Fr \sim \beta_* I_*$

3. あとがき 本研究では河床勾配、河床材料及び流量といったいわゆる外部条件のみに対して移動床に生じる現象を予測できた点に意義があると考え、この成果を用いると、着床が先に提案した¹⁾ように河床状の変形速度 $dD/dt = \text{func}(D, D_e; \beta_*, I_*, d_*)$ が予測され (D : 河床状のステール、添字 e は平衡状態での値を示し、本研究成果が適用される)、非定常流量下での移動床の応答性状をも述べ・予測し得ることになる。

<参考文献> 1) 中川、辻本、竹東: 第27回水誌, 1953. 2) Yalin: Proc. ASCE, HY5, 1964. 3) Fredsøe: Progr. Rep. ISVA, 1975. 4) Yalin: La Houille Blanche, 1969. 5) Guy, Simons & Richardson: USGS Prof. Paper 462-I, 1965.