

非定常時の移動床相互作用系について

京都大学工学部 正員 中川 博次
 京都大学工学部 正員 辻本 哲郎
 清水建設 正員 竹東 正孝
 日本K道コンサルタント 正員 〇和田 芳樹

1. まえがき 著者らは洪水時の河床波の挙動とそれによる流水抵抗の応答遅れを予測する目的で研究を進めてきたが、本報ではとくに河床波の変形速度を評価するのに用いられる平衡状態の河床波のスケールの予測に関係して検討された移動床の相互作用系について述べる。ここでは *dunes* の領域、とくにその上限に着目し、河床波のスケール、抵抗係数等が河床形態の領域区分と十分適合性を保って予測されることを目的とし、またその結果を用いて非定常時の応答遅れ性状についても検討を行った。なお、本研究では、河床勾配 I 、河床材料の粒径 d 、単位幅流量 q を既知量（外部条件¹⁾）としてすべての予測がこれらのみで行えるシステムを目指しており、次の無次元量を用いる¹⁾。 $g_* = g / \sqrt{(\sigma_p - 1)gd^3}$ 、

$I_* = I / (\sigma_p - 1)$ 、 $d_* = gd^3 / \nu$ (σ_p : 砂の比重、 g : 重力加速度、 ν : 水の動粘性係数)。

2. *dunes* の領域 まず、いわゆる *transition* が *dunes* の減衰領域の一部と考え（定常性、一様性が保たれれば遷移領域は出現しないと仮定）、*antidunes* の下限で *dunes* の上限が与えられるとした。これが図-1で、境界線は $g_* = K \cdot I_*^m$ --- (1) と表わされ $K = 0.184$ 、 $m = 1.73$ が適当と思われる。またこのとき、芦田・道上²⁾ の *upper regime* の下限とはほぼ一致する。図-1のような $g_* \sim I_*$ 面での他の領域区分の境界線を調べると式 (1) の形で K が d_* の関数、 m がほぼ1となり、 $g_* I_*$ を一つのパラメータで表わすのが便利であると考えられ、結局 $g_* I_* \sim d_*$ 平面での領域区分が推奨された¹⁾。但しこの場合 *dunes* の上限は I_* により、変わり、結局図-2のような領域区分図が得られた(文献2)の図-1(a)を修正)。

3. *dune regime* における河床波のスケール、抵抗諸量間の関係

dune regime において河床波のスケールを陽に含んだ形の抵抗

予測式として Yalin³⁾ によるものがあり、次式で表わされる。

$$C/\rho g = A_* / \sqrt{1 - \theta(1 - \frac{1}{2} A_*^2)} \quad \text{--- (2)} \quad \begin{matrix} C: \text{Chezy 係数} \\ H: \text{波高} \\ h: \text{水深} \\ \theta: \text{波形勾配} \end{matrix}$$

$$A_* = \text{func}(h/d) = \frac{1}{K} \ln \frac{A_0 h}{d} \quad \text{--- (3)}$$

ところで、*dunes* の場合、波長 L は、

$$L = k_L \cdot h \quad \text{--- (4)} \quad (k_L \approx 5 \sim 6) \quad \text{でよく表わされ、}$$

波形勾配は一般に無次元掃流力 T_* の関数となる。

但し、前章で示したように *dunes* の消滅限界を考慮すると、

$$\theta = \text{func}(T_*, I_*) \quad \text{--- (5)} \quad \text{と表わされる。}$$

図-1 *antidunes* の下限

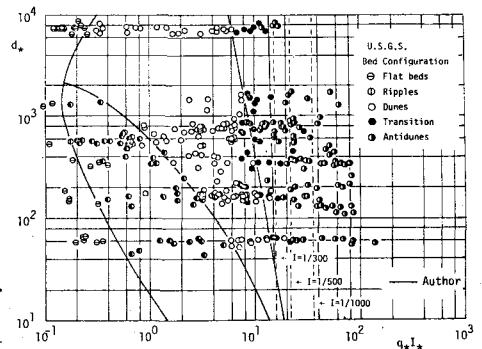


図-2 領域区分図

* Hiroji NAKAGAWA, Tetsuro TSUJIMOTO, Masataka TAKEZUKA and Yoshiki WADA

$\tau_* = I_* (h/d) \dots (6)$ と考慮すると、結局 $\theta = f_0(h/d, I_*)$ となり、結局式(2)で与えられる $C/\sqrt{g}$ は h/d と I_* の関数である。ところで定義より $C/\sqrt{g} = g_* I_* / (h/d I_*)^{1/2} \dots (7)$ であり式(2)、(7)を等置するこゝから $h/d = f_h(g_* I_*, I_*) \dots (8)$ が解けることになる。このとき、
 $L/d = k_f f_h(g_* I_*, I_*) \dots (9)$ 、 $\tau_* = I_* f_h(g_* I_*, I_*) \dots (10)$ 、
 $\theta = f_{unc}(I_*, f_h(g_* I_*, I_*)) = f_0(g_* I_*, I_*) \dots (11)$ 、 $H/d = k_i f_0 f_h \dots (12)$ 、
 $C/\sqrt{g} = g_* I_* \{I_* f_h\}^{-3/2} \dots (13)$ 、 $Fr = g_* \sqrt{(g\rho-1)} \cdot f_h^{-3/2} \dots (14)$ 、
 $Re_* = \{(g\rho-1) \cdot I_* d_* \cdot f_h\}^{1/2} \dots (15)$

というように関係諸量がすべて g_* 、 I_* 、 d_* (外部条件)のみで推定されることになる。なお、式(5)については次のように与えた。

$$\theta = \theta_F(\tau_*, \tau_{*c}) \cdot g(\tau_*, \tau_{*E}) \dots (16)$$

$$g(\tau_*, \tau_{*E}) = \{1 - (\tau_*/\tau_{*E})^m\}^{1/m} \dots (17)$$

にだし θ_F は Fredsøe⁶⁾ による θ の推定式で、式(17)は dunes の消滅限界 ($\tau_{*E} = 0.107 I_*^{-0.24} \dots (18)$) と考慮するものである。図-3 に式(16) と U.S.G.S. の実験データ⁵⁾ を比較した。また式(16)を得ると、式(8)~式(15)で dune regime の諸量がすべて計算される。その一例を図-4 に示す。他の量も含め、dune regime の移動床の状況が本システムで流す前のパラメータ (外部条件)のみでかなりうまく予測されているこゝがわかる。なお、式(15)を用い、 $Re_* = 10$ または 20 として ripples と dunes の境界線を求めたものが図-5 の実線であり、図-2 の領域区分をほぼ満足するこゝがわかる。

4. dunes の非定常応答について

dune regime における流量変動に対する応答は、dunes の変形に要する時間が重要なパラメータとなるこゝが指摘されている⁶⁾。その時間スケール $T_{EX} = k_T \cdot L_e \cdot H_e (1-\rho_0) / 2g_B \dots (19)$ と考える (添字 e は平衡状態の値) と、 L_e 、 H_e は前章の結果外部条件のみで予測される。一方流砂量についても前報¹⁾の検討より、次のように外部条件のみで与えられる。 $g_{Bx} = g_0 / \sqrt{(g\rho-1)} g d_*^3 = 0.117 \{g_* I_* - (g_* I_{*c})\}^{3/2} \dots (20)$

但し、 $(g_* I_{*c})$ は τ_{*c} より式(10)によ、て換算される。dunes の発達過程は実験データの検討より、 $V = H \cdot L$ として、

$$V/V_e = (t_*^k + 1)^{1/k} \dots (21) \quad (t_* = 2\alpha g_0 t / (1-\rho_0) V_e), \quad \alpha = 1/6, \quad k = -3)$$

で表わされ、 $V = 0.99 V_e$ となる時間を T_{EX} と定めた (このとき $k_T = 20$)。式(19)、(20)を式(19)に代入することで、河床波の発達時間も外部条件のみで与えられることになり、河床波を伴う非定常移動床流れの応答が予測される。流量変動を与えた場合の応答についての計算結果は講演時に示す。

<参考文献> 1) 中川・辻本・竹東 (1983) 第27回水講、2) 芦田・道上 (1972) 土論集、3) Yalin (1964) La Honille Blanche、4) Fredsøe (1975) ISVA、5) Simons et al. (1968) USGS prof. paper、6) 中川・辻本 (1981) 第25回水講

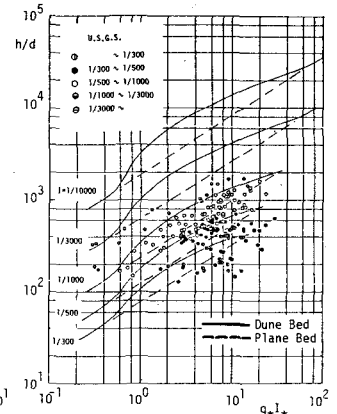


図-3 $\theta \sim \tau_*$

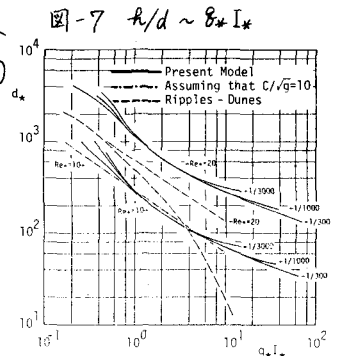


図-4 $d_* \sim g_* I_*$

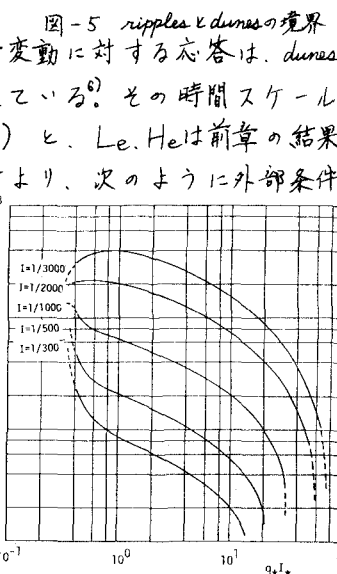


図-5 ripples と dunes の境界

図-6 河床波の発達時間