

砂漣と砂堆の共存についての理論的研究

Theoretical Study on the Coexistence of Ripples and Dunes

中央大学理工学部 林 泰造 Taizo HAYASHI
同 上 大学院 ○服部 弘司 Koji HATTORI

Formation of ripples and dunes on alluvial river bed is studied by river bed stability analysis, basing on two-dimensional shear flow equation and a Meyer-Peter and Müller type bed load transport equation modified by the inclusion of the lag distance of bed load relative to local bed shear. Dominant dimensionless wave-numbers of sand wave are analyzed. The effect of sediment particle diameter and lag distance on the dominant wave-numbers is examined, and the difference between ripples and dunes, with respect to their cause of occurrence, is discussed.

Keywords: ripples, dunes, two-dimensional sand waves

1. 序 論

移動床流れの下方レゾームにおいては、砂漣あるいは砂堆が発生する。ASCEの移動床河床形態小委員会(1966)¹⁾では波長が1 ft以下、波高が0.1 ft以下の2次元河床波を砂漣といい、それ以上の波長の波を砂堆と定義している。また、土木学会水理委員会移動床流れ研究小委員会(1973)²⁾では波長が粒径に依存するものを砂漣、主として水深によるものを砂堆として区別している。しかし、砂漣と砂堆は共存することもあり波長が1 ft以上で粒径に依存する河床波もあるので、両者の区別が明らかでなくなることが多い。本研究では2次元河床安定解析に基づき、砂漣と砂堆の発生機構及び両者の共存の状況並びに両者の区別について検討した。

2. 計算の基本式

計算に使用した基本式は前報³⁾と殆ど同様であるのでここではその摘要のみを記す。

水流の基本式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = gS - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $u=U+u$: x 方向の流速成分、 $v=V$: y 方向の流速成分、 S : 平均河床勾配、 $\varepsilon = \kappa u_* D / 6$: 渦動粘性係数、 κ : カルマン定数(=0.4)、 D : 平均水深。

主流速分布

壁領域ではlog法則を、また外部領域では下記の式(4)で表わされる y の2次曲線とし、両者を壁領域の外縁($y/D=0.19$ にとる)で連続につながるように定めたもの。

$$[U_s - u(y)]/u_* = [(U_s - U_b)/u_*] [1 - (y/D)^2] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 u_* : 主流速による底面せん断速度、 U_s : 水面における平均流速、 U_b : 河床面におけるスリップ流速である。また、log法則の式には滑面粗面を統一的に扱ったEinsteinによる表現式を使用。

掃流砂量式

Meyer-Peter and Müller 型の式に遅れ距離を導入した式。

$$\phi = 14[\tau_*(x - \delta) - \tau_{*c}]^{3/2} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\phi = q_B / \sqrt{(s-1)gd_s^3}$ ：無次元掃流砂量、 s ：砂の比重、 g ：重力加速度、 d_s ：砂の粒径、 $\tau_* = \tau_x^2 / (s-1)gd_s$ ：無次元掃流力、 τ_{*c} ：無次元限界掃流力、 δ ：流砂量と局所せん断力との間に存在する遅れ距離で

$$\delta = (\lambda_{s1}\tau_* + \lambda_{s2})d_s \quad (\lambda_{s1}=20, \lambda_{s2}=15) \dots\dots\dots (6)$$

限界掃流力：Shieldsの曲線

3. 関係基本パラメーターと行った計算の範囲

発生2次元河床波の無次元卓越波数 kD は次元解析により次のように表わされる。

$$kD = f\left(\frac{D}{d_s}, \frac{S}{s-1}, Rg\right) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $Rg = d_s \sqrt{gd_s} / \nu$ ：無次元粒径、 d_s ：粒径、 ν ：水の動粘性係数、である。しかし、本報では $s=2.65$ 、 $\nu=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ と固定して

$$kD = f\left(\frac{D}{d_s}, S, d_s\right) \dots\dots\dots (8)$$

の関係式に基づいて計算を行うこととし、

$$d_s = 0.1 \sim 1.0 \text{ mm}, S = 1/500 \sim 1/3,000, D/d_s = 100 \sim 2,500$$

の範囲の計算を大型電子計算機 (FACOM VP-30) を使用して行った。

4. 数値解析とその結果

本研究は初めに記したように、砂澱と砂堆の区別のために従来水工学上で一般に使用されてきた定義がそのままではいのかどうかの検討を1つの目標として計画されたものである。このため、本研究では、まず次の3点を数値解析により検討して、砂澱と砂堆の発生機構の相違点を研究した。

1) Shieldsの限界掃流力における砂粒 Reynolds 数 Re_* に対する τ_{*c} の変化が砂澱発生の成因をなすものであるかどうか。

2) 砂澱と砂堆の増幅率の比較。どちらが発生しやすいか。

3) 流砂量と局所せん断力との間に存在する遅れ距離 δ は砂澱及び砂堆の発生にどのような影響を及ぼすか。

(a) 限界掃流力の特性が発生河床波の卓越波長に及ぼす影響

上述の 1) に当たるものである。本報では壁領域的主流速分布を表わす $\log$ 式の中に含まれている滑面-粗面 transition parameter $x = \text{func}(U_* d_s / \nu)$ と無次元限界掃流力 $\tau_{*c} = \text{func}(U_* d_s / \nu)$ とを通じて形成河床波の卓越波長には粒径 d_s が関係する。 d_s をいろいろの値に変えてこの波長を計算したが、ここでは紙面の関係で、代表的な2例として $d_s = 0.2 \text{ mm}$ と $d_s = 0.6 \text{ mm}$ の場合の計算結果のみを示す。それらがそれぞれ図-1及び図-2である。ここに kD は形成河床波の無次元卓越波数、 D/d_s は相対水深、パラメーターは平均河床勾配である。

一方、図-3は $x=1$ 、 $\tau_{*c}=0.04$ をいずれも定数として計算した前々報⁴⁾の計算結果である。図-1及び図-2を図-3と比較する時、全体的な傾向はそれ程は異なっていない。 $kD = 2\pi D/L$ (但し L ：卓越波長)であり、横軸は D/d_s であるから、これらの図で右上方に向けて立ち上がっている部分では

$$L \propto d_s^m \quad (m: \text{ベキ数}) \dots\dots\dots (9)$$

であり、比較的レベルに近い部分では

$$L \propto D \dots\dots\dots (10)$$

である。土木学会水理委員会「移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会」(ここでは以後 JSCE-TC と略称する)の定義によれば式(9)、式(10)の部分がそれぞれ砂澱及び砂堆を表わすものである。本節では砂澱と砂堆に対するこの定義により解析結果の考察をすすめる。

(b)砂澁と砂堆の増幅率の比較

図-4は図-3(すなわち $x=1$, $\tau_{xc}=0.04$)で $S=1/2,000$ の場合の形成河床波の初期増幅率 kC_1 を D/ds をパラメーターとし kD について図示したものである。 D/ds の値が小さい時には正の増幅率の極大値は1つしかないが、 $D/ds=500$ 以上ではこの極大値は2つできている。同図中に R 及び D の記号で示したものがそれぞれ砂澁及び砂堆の各無次元卓越波数であり、図-3と見比べて JSCE-TC の定義によれば、この場合 D/ds の値が600以下の時には同じ D/ds の値について R の方が D より低波数であり、砂澁の方が砂堆より波長が「長い」ことが興味深い。

図-1及び図-2の場合についての初期増幅率も同様にして計算してあるが、 $S=1/2,000$ の場合にはそれらの図は図-4と比べると概形は殆ど変化していない。

(c)遅れ距離 δ の影響

遅れ距離 δ が0であると、図-1及び図-2はそれぞれ図-5及び図-6となり、JSCE-TS の定義による砂澁が発生しなくなる。

(d) Shields の図表上の砂澁、砂堆発生領域区分線

図-7は Guy et al.⁵⁾ による実験値に基づいて Vanoni⁶⁾ が作成した図面であるが、波長の内挿曲線は筆者らが暫定的に書き加えたものである。Guy 等は L が2ft以下のものを砂澁、2ft以上を砂堆としており、その定義により記号分けしてデータがプロットされている。右下に立ち下る斜線は Vanoni により示された両形態の区分線である。

(e) Shields の図表上に記入した小規模河床波の卓越波長

$S=1/2,500$ の場合の卓越波長を図-7と同一のグラフ上に記入したものが図-8である。実線部分は JSCE-TC の定義による砂堆を、また破線部分は砂澁を表わす部分である。また、ドットを連ねた部分は今のところ数値計算不能となる部分である。

図-9は図-8の部分的な拡大図であり、この上で $ds=0.4mm$ の河床上に形成される河床波の波長を考えてみる。 τ_x と Re_x とは

$$\tau_x = \frac{v^2}{(s-1)gd_s^3} \cdot Re_x^2 \dots\dots\dots (11)$$

の関係式で結ばれているから、 τ_x が増加すると状態点は図示破線の上を右上に向けて移行する。いま $\tau_x=0.13$ の時の発生河床波の卓越波長は A点の値で与えられ、次の2つの値が読みとられる。

隣接実線の内挿から $L=32cm$ (砂堆)； 隣接破線の内挿から $L=45cm$ (砂澁)

同様に $\tau_x=0.20$ 、すなわち B点では

隣接実線の内挿から $L=57cm$ (砂堆)； 隣接破線の内挿から $L=35cm$ (砂澁)

となり、 τ_x の増加とともに砂澁と砂堆の波長の大小関係が途中で逆転する。

5. 砂澁と砂堆の定義について

ASCE-TCとJSCE-TCの定義は既述の通りであるが、この他にGuy et al.の定義(2ft以下を砂澁、2ft以上を砂堆)もある。Vanoniは ASCE-TC の定義(1ft以下を砂澁)に據っているが、図-7の Legend は Guy et al. の定義によるもので紛らわしい。

1ftあるいわ2ftという長さで区分すれば整理上は明瞭であるが、発生機構の違いは考慮に入らない。

JSCE-TCの定義では D/ds と S の値を等しくする砂澁と砂堆において砂澁の方が波長が大きい場合もあることは説明しにくい。

筆者らは本研究の範囲内で得られた結論の一つとして「遅れ距離がなくても発生する河床波が砂堆、遅れ距離がなければ発生しない河床波が砂澁」という区分案を暫定的に試案として提案する。今後さらに研究を重ねてこの両小規模河床形態の発生機構の違いを明かにしてゆきたい。

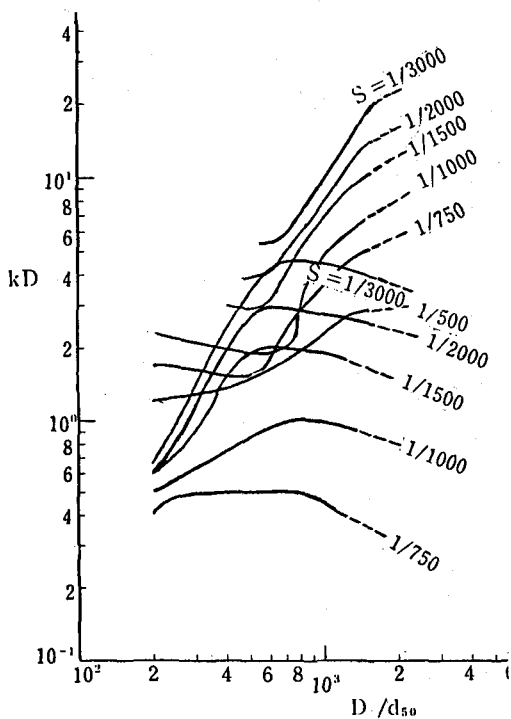


図-1 発生河床波の卓越波数($d_s=0.2\text{mm}$ の場合)

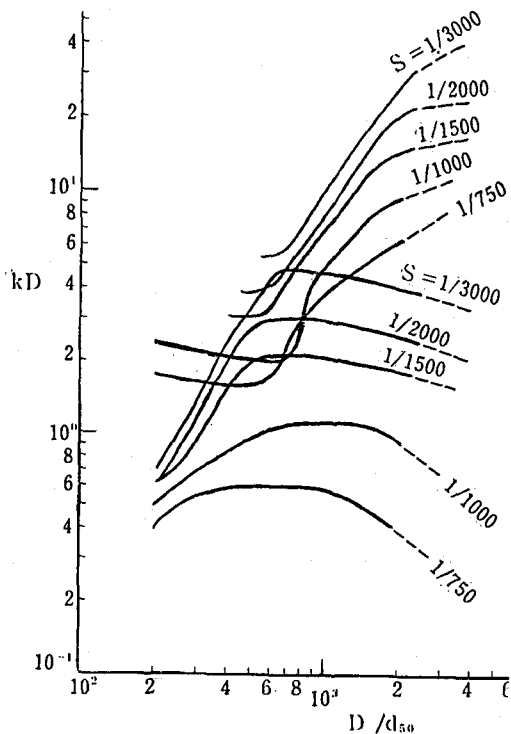


図-2 発生河床波の卓越波数($d_s=0.6\text{mm}$ の場合)

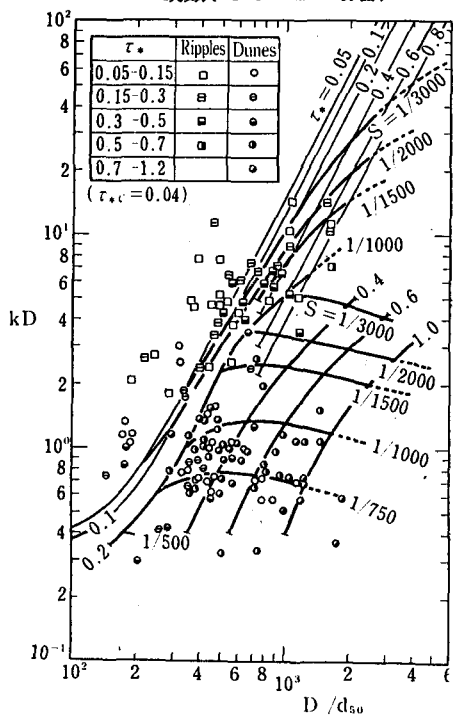


図-3 $\chi=1, \tau_{*c}=0.04$ の発生河床波の卓越波数(林・大西⁴⁾)

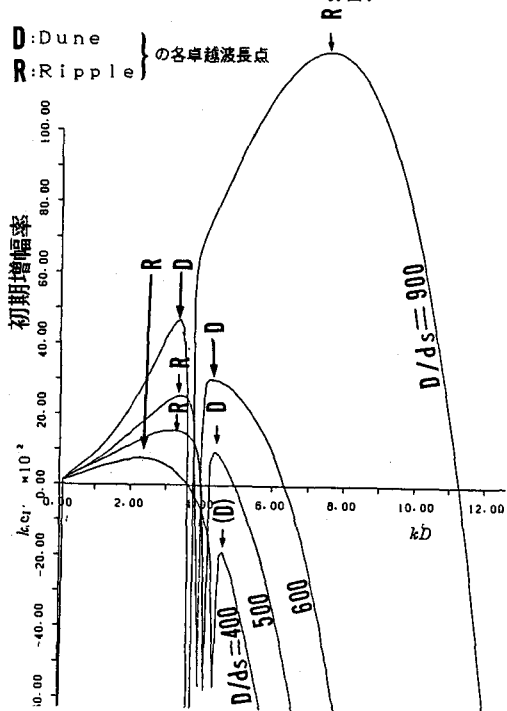


図-4 図-3で $S=1/2,000$ の場合に
つての発生河床波波高の初期増幅率

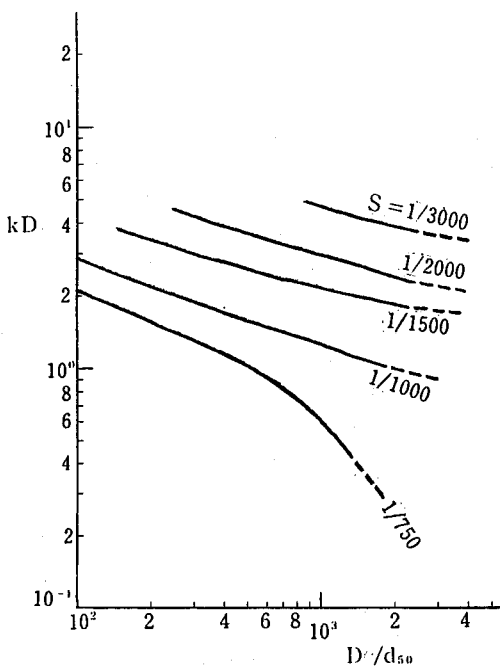


図-5 遅れ距離がない場合の発生
河床波の卓越波数($d_s=0.2\text{mm}$ の場合)

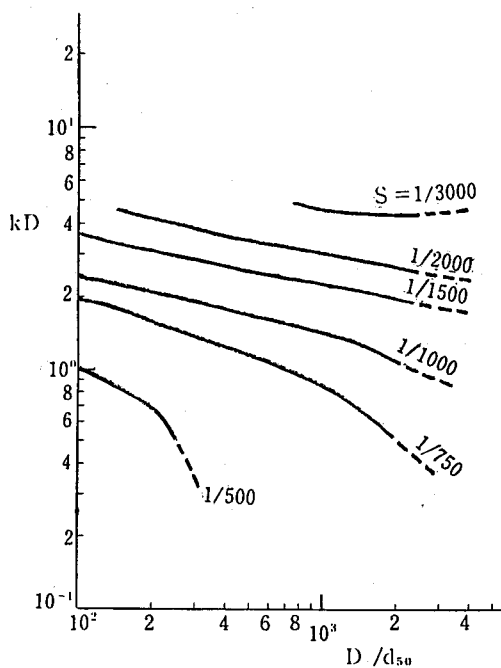


図-6 遅れ距離がない場合の発生
河床波の卓越波数($d_s=0.6\text{mm}$ の場合)

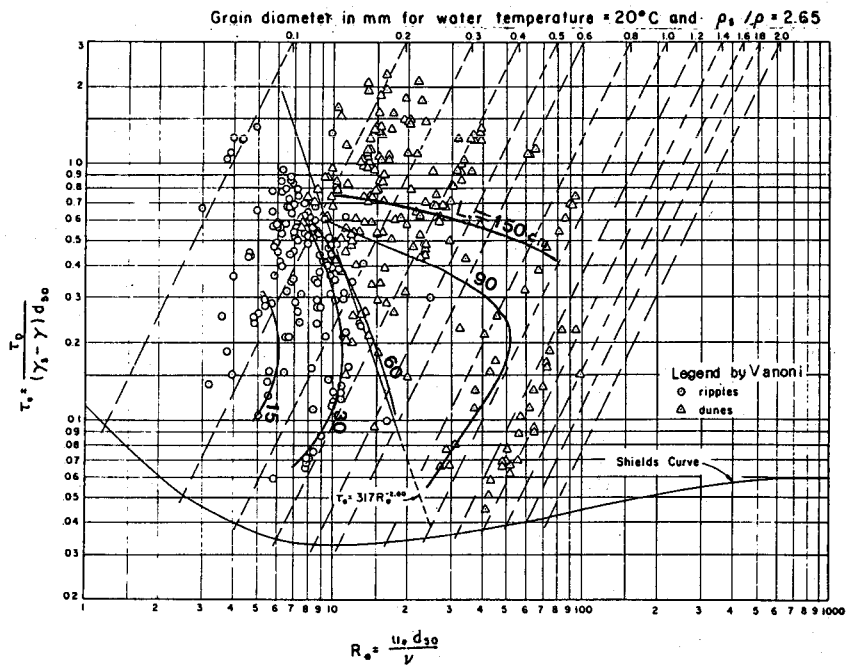


図-7 砂漣・砂堆の発生領域区分図(Vanoni⁶⁾)
(但し波長の内挿線は筆者らが試的に挿入したもの)

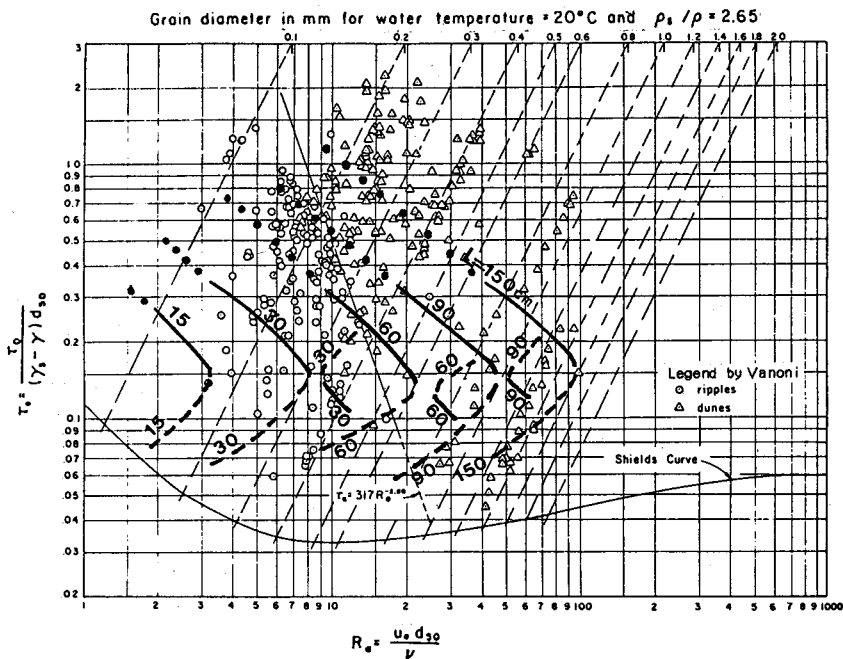


図-8 発生小規模河床波の卓越波長の計算値
($S=1/2,500$ の場合)

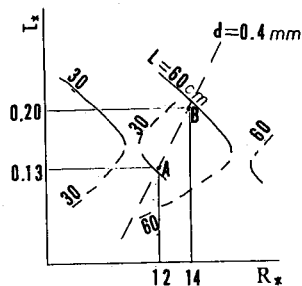


図-9 図-8の部分的拡大図

6. 引用文献

- 1) ACSE Task Committee for the Preparation of the Manual on Sedimentation, Sediment Committee of Hydraulics Div., ASCE, 1975, 745p.
- 2) 土木学会水理委員会 移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会, 移動床流れにおける河床形態と粗度, 土木学会論文報告集第210号, 1973, pp. 65-91.
- 3) 林 泰造・大西光陽・高橋 進, 粒径の影響を考慮した2次元河床安定解析, 第29回水理講演会論文集, 1985, pp. 455-460.
- 4) Hayashi, T. & Onishi, M., Wave-lengths of sediment ripples, dunes and antidunes, The 100th Anniv. Bull. of Chuo Univ., 1985, pp. 327-339.
- 5) Guy, H.P., Simons, D.B. & Richardson, E.V., Summary of alluvial channel data from flume experiments 1956-61, US Geol. Survey Prof. Paper 462-1, 96p.
- 6) Vanoni, V.A., Factors determining bed forms of alluvial streams, Closure of Discussions, J. Hyd. Div. ASCE, Vol. 101, HY11, pp. 1435-1440.

7. 謝 辞

論文作成に関しては中央大学大学院理工学研究科院生 村上真人、及び学部生 大島一之の両君よりの熱心な協力を得た。深甚なる謝意を表する。