

九州大学 正員 渡辺 訓南

学生員 ○ 岡田 豊昭

正木 清嗣

移動床の水路や河川の底面には、一般に、波状の凹凸(砂漣)が発生し、流れの粗度や流砂量に大なる影響を及ぼす。砂漣の scale は底質や水理条件に規定されるが、ここでは多くの資料を基にそれらの間の関係を調べ、若干の考察を行なう。

1. 河床波の性質

Ripple, Dune の領域で水深 h と波長 λ との比 h/λ を砂粒 Reynolds 数 $\frac{u_* d_{50}}{\nu}$ との関係を探ると、亦で Yalin が示しているように、

$\frac{u_* d_{50}}{\nu} \geq 20$ では Dune で $h/\lambda \approx 0.2$, $\frac{u_* d_{50}}{\nu} < 20$ では Ripple で h/λ は大きく変化して両者の間には相関がなくなる。以下、 $\frac{u_* d_{50}}{\nu} \geq 20$ なる資料を Dune, $\frac{u_* d_{50}}{\nu} < 20$ を Ripple として、その形状特性を調べる。資料は左表に示す通りである。

記号	実験者	d_{50} (mm)	記号	実験者	d_{50} (mm)
○	土木研究所	0.8~10	⊕	橋(斐伊川)	1.1~1.4
●	田中	0.73	⊗	橋(人工水路)	1.3~2.2
⊙	Vanoni	0.14~0.23	⊖	橋(実験水路)	0.33~0.84
⊗	Kennedy	0.23~0.93	⊙	Laursen	1.1
⊗	白砂	0.8	⊗	Straub	0.69
⊙	Simons	0.45	⊗	Ackers	0.16

波高: 河床波を近似的に三角波とみれば、その波高を Δ 、波速を U_0 とすれば、連続の式と形状不変の仮定とから、1 波長間の平均の流砂量 $Q_0 = (1-\epsilon)U_0 \frac{\Delta}{\lambda}$ で表わせる。今、波速 U_0 としては槽内平均流速 U を用いると、結局、波高 Δ は次式のようになる。

$$\frac{\Delta}{h} \frac{\frac{u_* d_{50}}{\nu}}{1-F^2} = \frac{2(\beta^2 E^2 + 1)}{\beta^2 E^2 \alpha + (2+2\alpha)}, \quad E = \frac{\lambda d}{h} (1 + A_* \alpha_0) \dots \textcircled{1}$$

①式を用いて計算値と実験値とを比較したのが図-1, 2 である。散らばりはあるが、特に Dune については可成り良い結果が得られている。尚、①式の右辺はほとんど E に等しく、この場合、Dune 及び Ripple の波高は各々次式で表示できる。

$$\left. \begin{aligned} \text{Dune: } \frac{\Delta}{h} &= \frac{2}{3} \frac{1}{1-F^2} \left(1 - \frac{u_*}{U_0}\right) \cdot E \\ \text{Ripple: } \frac{\Delta}{h} &= \frac{2}{3} \frac{0.64}{1-F^2} \left(1 - \frac{u_*}{U_0}\right) \cdot E^{0.59} \end{aligned} \right\} \dots \textcircled{2}$$

波長: Dune の場合、 λ/h を有初掃流長さに対して plot したのが図-3 である。可成り散らばっているが、実験水路では平均的に $\lambda/h \approx 5.5$ と Yalin とほぼ同様の値である。又、河川(斐伊川)の資料では若干小さく $\lambda/h \approx 3.0$ である。次に、Ripple の場合は図-4 に示すように λ/d が h に対して良くまとまり、

$$\lambda/d = 1.64 \times 10^3 \cdot u_*^{0.358} \dots \textcircled{3}$$

である。土研及び著者らの資料は他の資料より波長が小さいが、ほぼ平行であり、著者らの資料が Ripple の発生初期波長

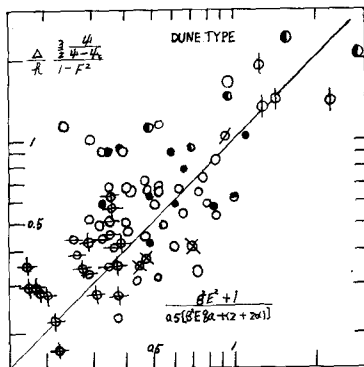


図-1

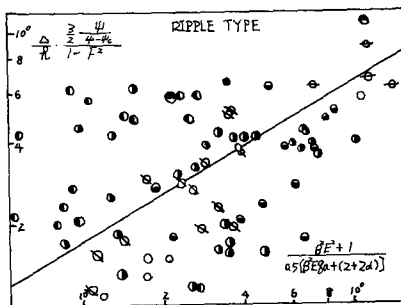


図-2

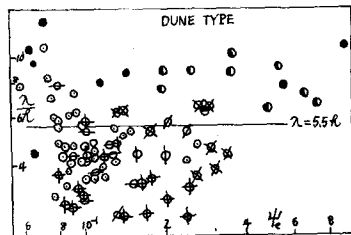


図-3

を測定したものであることを考慮するならば、Ripple が発達するに従って、その波長が伸びていくことを示しているものと思われる。

波形勾配：波形勾配 Δ/λ は上述の關係を用いれば

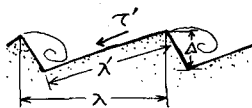
$$\text{Dune} : \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{\Delta/\lambda}{\lambda/\lambda} = \frac{(1-F^2) \cdot \frac{2}{3} \cdot (1-\frac{u_c}{u_m}) \cdot E}{5.5} \propto f(u_c, I)$$

$$\text{Ripple} : \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{\lambda}{d} \frac{\Delta/\lambda}{\Delta/d} = \frac{(1-F^2) \cdot \frac{2}{3} \cdot (1-\frac{u_c}{u_m}) \cdot \lambda_1 (1+A \cdot \bar{u}_0)}{1.64 \times 10^3 \cdot u_c^{0.586}} \propto f(u_c)$$

であるが、一応実験資料における I の変化が小さいことと、 u_c の方が重要な parameter であることから、 Δ/λ と u_c との關係を Dune 及び Ripple の場合について plot したのが図-5、6 である。いずれも u_c が大きくなるにつれて Δ/λ は大きくなるが、Dune の場合は $u_c \div 0.2$ で極大を持ち、さらに u_c が増大すると崩壊していくものと考えられる。Ripple の場合は、 u_c に対して明瞭な Δ/λ の増大が認められ、平均的には $\Delta/\lambda \div 0.34 u_c^{0.586}$ ④ である。
(RFL $u_c < 0.6$)

2. 河床波の抵抗

1 波長間の全抵抗を T_0 、砂連背風の抵抗を T' 、抵抗係数を C_x とすれば、右図を参照して、1 波長間の力の釣合いは



$$T_0 = \frac{1}{2} \rho C_x u_m^2 \frac{\Delta}{\lambda} + T' \frac{\lambda'}{\lambda} \quad \dots \dots \dots ⑤$$

である。ここで、 $\lambda' \div \lambda$ 、 $u_m \div u_m$ とし、 T' として有効群流力の式 $T_0 = T_0' \frac{\rho}{\rho_0}$ ($\rho = \frac{u_m}{u_0}$) を用いると、 C_x は Δ/λ の關係と考えられるから、結局、次の様な關係になる。

$$\frac{1}{\rho} \sqrt{1 - \frac{\rho}{\rho_0}} \propto f\left(\frac{\Delta}{\lambda}\right) \propto f(u_c, I)$$

前述のように u_c が大きく初くと考えて、 $\frac{1}{\rho} \sqrt{1 - \frac{\rho}{\rho_0}}$ と u_c との關係を示したのが図-7 であり、 u_c の増加と共に抵抗は増大し、Dune の場合は $u_c \div 0.2$ で極大値を持つ。又、Ripple は小さい u_c においても Dune より波形勾配が大きいことを考慮すれば、sand wave の形状及びその発達・崩壊の過程が移動床流の抵抗法則に如実に反映されていることがわかるであろう。

終りに、本研究は指導教授の指導のもとに行なわれたものであり、今後、固定床の粗度との関連をも考慮しつつ、実験的、理論的に研究を進める予定である。

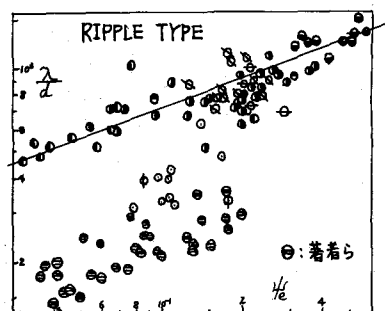


図-4

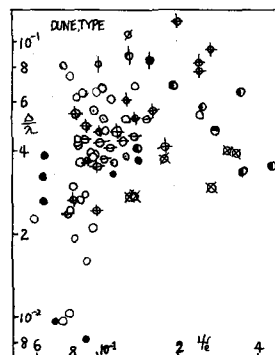


図-5

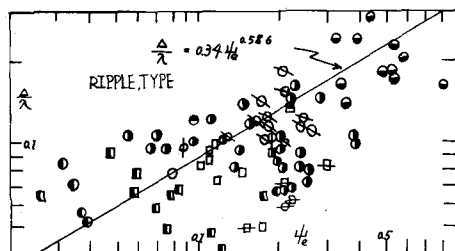


図-6

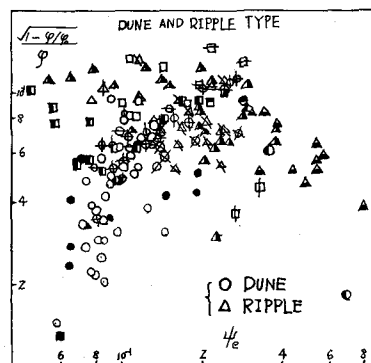


図-7