

(財)電力中央研究所 正員 尾崎幸男・石橋 毅

1. はじめに

移動床流れは固定床とは異なり砂礫の搬送と河床変形を伴うことからその抵抗則の解明はかなり難しいものとなっている。この原因の1つとしては、各水理量を整理する際に用いるパラメーター（例えば無次元掃流力 τ_* など）自体にも種々の影響が含まれていることと上げられる（図-1）。

本報告は、移動床流れの抵抗則に関して考察を行い、流砂による抵抗増減の物理的意味について述べるとともに各水理量を無次元有効掃流力 τ'_* について整理検討し、外部パラメーターとして有効掃流力 τ'_* が適切であることを示したものである。

2. 抵抗の定義式

本研究においては抵抗則を次式で定義する。

$$\frac{v}{u_*} = \frac{2.3}{K} \log_{10} \left(12.27 \frac{R}{k_s} \right) \cong C \frac{K_0}{K} \left(\frac{R}{k_s} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

また、河床は完全粗面流の状態にあるとすると有効掃流力 τ'_* は次式から求められる（Einstein の方法）。

$$\frac{v}{u_*'} = \frac{2.3}{K_0} \log_{10} \left(12.27 \frac{R'}{d} \right) \cong C \left(\frac{R'}{d} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2)$$

ここに、 v ：断面平均流速、 $u_* = \sqrt{g R I_e}$ 、 $u_*' = \sqrt{g R' I_e}$ 、 K 、 K_0 ：土砂流および清水の場合の Karman 定数で、 $K_0 = 0.4$ 、 k_s ：砂粒相当粗度、 d ：河床砂礫の（平均）粒径、 R 、 R' ：径深および有効径深、 I_e ：エネルギー勾配、 C 、 m ：定数（表-1）。

表-1 C と m

R/k_s , R'/d	C	m
2 ~ 10	6.8	4
10 ~ 10 ²	8.3	6
10 ² ~ 10 ³	10.0	8
10 ³ ~ 10 ⁴	11.8	10
(*) Manning-Strickler	$\frac{v}{u_*} = 7.66 \left(\frac{R}{k_s} \right)^{\frac{1}{5}}$	

式(2)から有効径深 R' を求めると次式となる。

$$\frac{R'}{d} = \left[\frac{v}{C \sqrt{g d I_e}} \right]^{\frac{2m}{m+2}} \quad (3)$$

抵抗係数 f 、表面摩擦抵抗係数 f' 、掃流力 τ_* およ

び有効掃流力 τ'_* はそれぞれ以下のように表わされる。

ただし、 S は河床砂礫の比重である。

$$\sqrt{8/f} = v/u_*, \quad \sqrt{8/f'} = v/u_*' \quad (4)$$

$$\tau_* = u_*^2/[g(S-1)d], \quad \tau_*' = u_*'^2/[g(S-1)d] \quad (5)$$

さて、式(1)と(2)から次式を導くことができる。

$$\frac{K}{K_0} \left(\frac{k_s}{d} \right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{\tau_*'}{\tau_*} \right)^{\frac{m+2}{2m}} = 1 \quad (6)$$

この式から、 K/K_0 、 τ_*/τ_*' 、 k_s/d の3者は独立ではなく互いに従属関係にあることがわかる。問題はこれらのうち2つを他の水理量と関係付けることである。

一方、式(4)と(6)からは、抵抗の増減を示す次式を得る。

$$\frac{f}{f'} = \left[\frac{\tau_*'}{\tau_*} \right] = \left(\frac{K}{K_0} \right)^{\frac{2m}{m+2}} \cdot \left(\frac{k_s}{d} \right)^{\frac{2}{m+2}} \quad (7)$$

Wash load と 3 級砂
による抵抗の減少

掃流砂や河床砂
による抵抗の増大

因に、Manning の粗度係数 n は次式で表わされる。

$$\frac{n}{d^{1/3}} = C' \left(\frac{R}{d} \right)^{\frac{m-6}{6m}} \cdot \left(\frac{K}{K_0} \right) \cdot \left(\frac{k_s}{d} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (8)$$

よって(7)、(8)より抵抗増減の物理的意味がわかる。

3. 実験資料による検討

従来の研究で抵抗に関する諸量、例えば k_s/d 、 v/u_* などと掃流力 τ_* の関数として表わすことは、 τ_* には種々の河床抵抗の効果が含まれており適切を表示とは言えない（図-1、2 参照）。そこで本研究では τ_* 代えて、砂礫の搬送に重要な役割を果たす有効掃流力 τ'_* を外部パラメーターとして水理量の検討を行った。ここで、用いた資料を表-2に示す。

表-2 実験資料と記号の説明

- 高瀬川地理実験 (Flat & Antidunes):
 - ▲ No.1-1, $R/d_m = 2.82 \sim 4.41$, $R_b/d_m = 3.39 \sim 6.09$
 - No.1-7, $R/d_m = 1.84 \sim 3.14$, $R_b/d_m = 2.51 \sim 5.70$
- Vanoni & Brooks の実験 (Sand No.5):
 - Dunes $\left. \begin{array}{l} R/d_g = 3.13, \quad d_g = \sqrt{d_m d_b} \\ \text{Sand Waves} \end{array} \right\}$
 - Flat $R_b/d_g = 3.43 \sim 4.41$
- Rio Grande River at Bernalillo (April-July, 1952):
 - △ Section A-2, $R/d_{50} = 2300 \sim 3420$
 - Section F, $R/d_{50} = 1030 \sim 2050$
- Missouri River Mile 609-616 (1966~1975):
 - Dunes, $R/d_{50} = 11,100 \sim 16,800$

検討結果の1例を図1から図5に示した。

図1の τ_{cb}/τ_{cc} による v/u_{cb} には流れの多価性が顕著に現れるが、 τ'_c/τ_{cc} を用いると図2となり多価性はかなり解消できる。また、 v/u_{cb} は τ_{cb}/τ_{cc} に対して右下りの傾向を、 τ'_c/τ_{cc} に対しては右上りの傾向を示す。

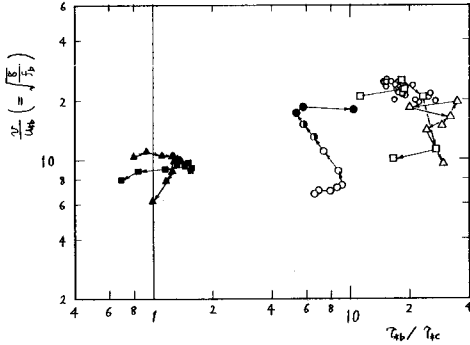


図-1 v/u_{cb} と τ_{cb}/τ_{cc}

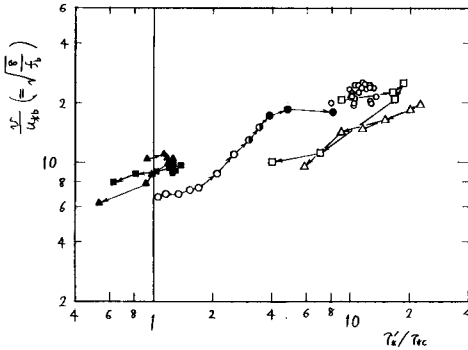


図-2 v/u_{cb} と τ'_c/τ_{cc}

ところで、河床形態の発生および形成領域は河床安定理論などにより説明されつつあるが、この場合にもやはり図3に示すように有効掃流力 τ'_c/τ_{cc} を用いた方が良いものと考えられる。

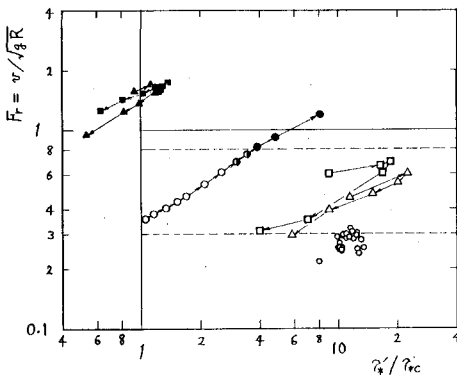


図-3 Froude 数 Fr と τ'_c/τ_{cc}

次に、河床の抵抗係数の増加の割合 f_b/f' と Karman 定数を含む砂での相当粗度をそれぞれ図4、5に示す。図5は図4を増幅したことに対応し、各水理量の精度はすべて相当粗度に大きく反映することがわかる。このように相当粗度の精度向上は重要な課題である。

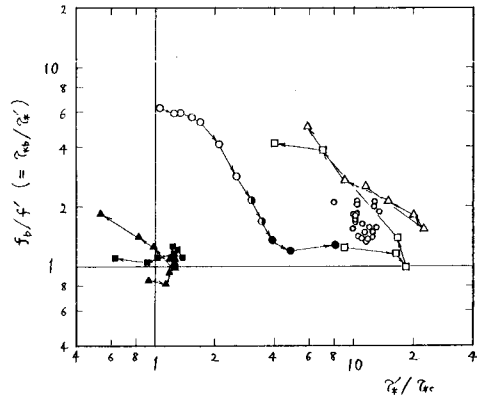


図-4 f_b/f' と τ'_c/τ_{cc}

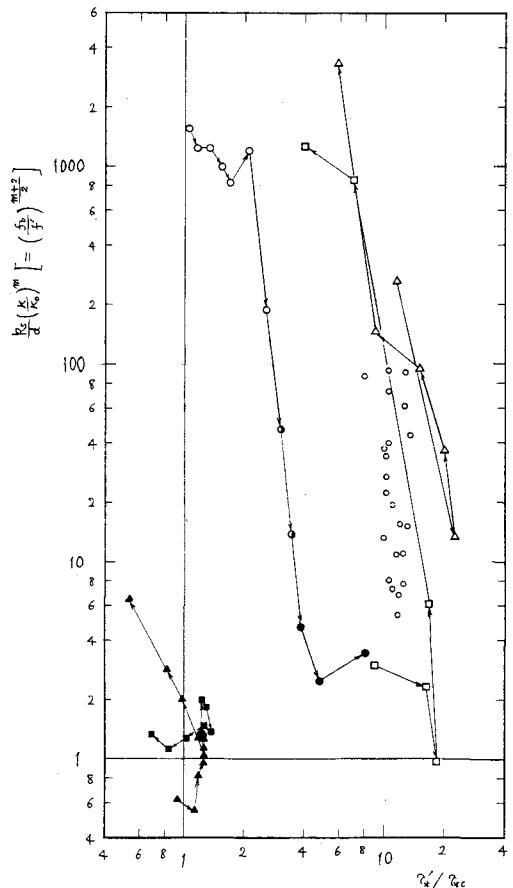


図-5 $(k_s/d)(k/k_o)^m$ と τ'_c/τ_{cc}