

移動床流れの抵抗則に関する研究

FLOW RESISTANCE IN MOBILE-BED RIVERS

尾崎 幸男*・石橋 毅**・白砂 孝夫***

By Sachio OZAKI, Takeshi ISHIBASHI and Takao SHIRASUNA

1. 概 説

移動床流れ^{注1)}の抵抗則はこれまでにいろいろな観点から多くの研究がなされてきたが、まだ水理学および河川工学上解明すべき基本的な課題となっている^{1),2)}。この抵抗則解明を困難にしているのは、移動床流れは砂礫の流送と河床形態の変化を伴う流れであることから、これらと流れの抵抗とが相互にかかわり合っている複雑な現象のためである³⁾。この結果、各水理量を整理する際に用いられるパラメーター自体にも種々の影響が入ってくる^{3),4)}。

また、河床における浸透性の問題^{5),6)}、河道の蛇行性や網状性などの平面的形態の抵抗への寄与⁷⁾、粒径範囲の広い混合粒径河床においては、砂礫の移動限界や流れの抵抗則に関して粒度分布の効果が顕著に現われること⁸⁾⁻¹⁰⁾、なども要因の1つとなっている。

一方、山地河川やダム直下流の Armor coat 上でみられる礫床流れ^{注2)}の抵抗則は近年活発な研究が行われている問題であるが移動床流れとの区別がはっきりしないなど未解決の点が多い⁹⁾⁻¹¹⁾。

本研究は、流砂量、河床形態および流れの抵抗に関する従来の知見に基づいて、移動床流れの特徴的なパラメーターにより既往資料の相当粗度に関する整理を行い、移動床流れと礫床流れを明確に区分するとともに、また、河床形態等による抵抗増減が反映し得るような移

動床流れの相当粗度に関する経験式を作成したものである。

2. 移動床流れにおける平均流速公式

(1) 相対粗度の定義

本研究においては、流れの抵抗則に関する要因のうち、河床の浸透性および河道の平面形態の影響が他の要因に比べて小さい開水路流れを想定する。このとき、平均流速公式は一般に式(1)で表わされる。式(1)は流砂や河床形態などの抵抗因子の効果を含んでいる。このような抵抗因子の効果を排除した場合の河床の表面摩擦抵抗(いわゆる skin friction)のみにより決まる平均流速公式は Einstein¹²⁾により式(2)のように定義されている。

$$\frac{v}{u_*} \left[= \sqrt{\frac{8}{f}} \right] = \frac{2.3}{\kappa} \log_{10} \left(12.27 \frac{xR}{k_s} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{v}{u_*'} \left[= \sqrt{\frac{8}{f'}} \right] = \frac{2.3}{\kappa_0} \log_{10} \left(12.27 \frac{x'R'}{d} \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 v ：断面平均流速 (m/s)、 u_* 、 u_*' ：摩擦速度および有効摩擦速度 (m/s) で、 $u_* = \sqrt{gR I_e}$ 、 $u_*' = \sqrt{gR' I_e}$ 、 f 、 f' ：河床の全抵抗係数および表面摩擦抵抗係数(-)、 R 、 R' ：径深および有効径深 (m) であるが粗度の異なる側壁を有する実験水路においては河床の粗度に対する R_b 、 R_b' を用いる、 I_e ：エネルギー勾配 (-)、 κ 、 κ_0 ：土砂流および清水流の場合の Karman 定数^{2),13)} (-) で、 $\kappa_0 = 0.4$ 、 k_s ：砂粒相当粗度 (m)、 d ：河床砂礫の代表粒径(平均粒径あるいは d_{65}) (m)、 x 、 x' ：水理学的粗面と滑面を接続するパラメーター (-) で、 $x = \text{func.}(u_* k_s / 11.6 \nu)$ 、 $x' = \text{func.}(u_*' d / 11.6 \nu)$ として Einstein¹²⁾ の図表から求められる、 ν ：流体の動粘性係数 (m²/s)、 g ：

* 正会員 工博 (財) 電力中央研究所研究開発本部原子力部担当研究員

** 正会員 (財) 電力中央研究所土木研究所環境部主任研究員

*** 正会員 工博 (財) 電力中央研究所広報部広報担当課長

注 1) 移動床流れとは、流水による河床砂礫の侵食・運搬・堆積作用(すなわち流砂)と河床波を伴う流れである。

注 2) 礫床流れとは、流砂がほとんど存在しない河床砂礫の粗い河床上の低流量流れである。このため相対径深が比較的小さい。

重力加速度=9.8(m/s²) .

ところで、実際河川における実測値にはいろいろな抵抗因子が一緒に含まれており、現状においてはそれらの抵抗因子を精度よく分離する方法が確立されていない。

そこで、本研究においては種々の抵抗因子をすべて取り入れた形での、式(1)を変形した式(3)で定義する相当粗度 \hat{k}_s について検討を行うこととする。

$$\frac{v}{u_*} = \frac{2.3}{\kappa_0} \log_{10} \left(12.27 \frac{R}{\hat{k}_s} \right) \dots\dots\dots(3)$$

ここで、相対粗度 \hat{k}_s/d 、および相対径深 R/d (または R_b/d) を次のように置く。

$$\zeta \equiv \hat{k}_s/d, \xi \equiv R/d \text{ または } R_b/d \dots\dots\dots(4)$$

式(3)より、 $\kappa_0=0.4$ として相対粗度 ζ を表わすところのようになる。

$$\zeta = 12.27 \xi 10^{-\varphi/5.75} \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $\varphi \equiv v/u_*$: 流速係数。

また、Manning の粗度係数 “ n ” は次式で表わされる。

$$n = R^{2/3} I_e^{1/2} / v = R^{1/6} / [g^{1/2} \varphi] \text{ (m}^{-1/3} \cdot \text{s)} \dots\dots(6)$$

以上の式(3),(5) および(6) は同一内容を表わすものであり、流れの抵抗則を解明するためには、 φ , ζ および n のいずれかを水理現象を反映し得るパラメータにより定式化すればよい。ところが、このうち φ や n は水理量の変化に対して鈍感であるのに対し、 ζ は敏感に反応することから、流れの抵抗則あるいは流量または水深の推定値の精度向上は ζ の適切な表示式の確立によって前進するものと考えられる。

(2) 移動床流れの抵抗増減

流れの抵抗則に関するこれまでの知見をとりまとめると、相対粗度 ζ に関するパラメータは以下のようになる。

$$\zeta = \text{func.}(\xi, \tau_*, \tau_*', F_r, R_e, B/R, R_*) \text{ または } d_* \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 τ_* , τ_*' : 河床砂礫に対する無次元掃流力および無次元有効掃流力で、 $\tau_* = u_*^2 / [(s-1)gd]$, $\tau_*' = u_*'^2 / [(s-1)gd]$, s : 砂礫の比重, F_r : 流れの Froude 数で、 $F_r = v / \sqrt{gR}$, R_e : 流れの Reynolds 数で、 $R_e = 4vR / \nu$, B/R : 相対水面幅, R_* : 砂粒子 Reynolds 数で、 $R_* = \sqrt{(s-1)gd^3} / \nu$, d_* : 無次元粒径で、 $d_* = R_*^{2/3} = [\sqrt{(s-1)g} / \nu]^{2/3} \cdot d$.

次に、移動床流れにおける河床の抵抗は河床波の形成、特に Ripples, Dunes および Antidunes などの小規模河床形態と密接に関係していることが知られている²⁾ .

ここで、小規模河床形態の形成に関する実験的事実およびこの現象を理論的に

説明しようとする河床安定理論に基づく研究^{2),14)~18)} によると、流れの Froude 数あるいは無次元掃流力の増加に伴って Ripples や Dunes が形成され、さらに Froude 数あるいは無次元掃流力が増加すると、河床形態は Transition → Flat bed → Antidunes と変化してゆくことが示されている。このことを相対粗度 ζ と関係付けるため、河床形態の影響の入らない無次元有効掃流力 τ_*' と無次元限界掃流力の比値を、

$$\eta \equiv \tau_*' / \tau_{*c} : \text{相対有効掃流力} \dots\dots\dots(8)$$

とおく。

さて、相対径深 $\xi \approx \text{constant}$ の場合について河床形態と相対粗度 ζ の関係を考えると、 η の増加に従って ζ が増加し Ripples や Dunes の河床形態で最大となる。さらに η の増加に伴う河床形態の変化に従って ζ が減少することになる。

以上のことを表-1 に示した。また、表-1 を模式的に示すと 図-1 のようになる。ただし、従来からいわれているような Antidunes で再び抵抗が増加するという点に関しては、このときは η がかなり大きいため浮遊砂が多く、Karman 定数の減少による抵抗減少と河床波による抵抗増加とが相殺されることから、Antidunes における抵抗の増減は明確に把握することが難しい。したがって、本研究においては $\zeta \sim 1$ として取り扱った。図中の ζ_p , η_p および α については後述する。

小規模河床形態の形成による流れの抵抗増大に関する従来の研究^{2),19),20)} は、抵抗の増加分 $\tau_* / \tau_*' (= f / f')$ を

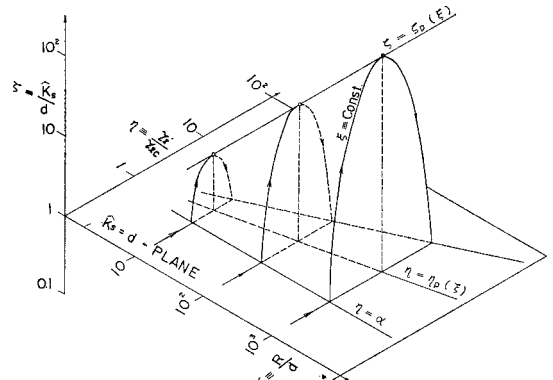


図-1 移動床流れにおける相対粗度 ζ の構造 (概念図)

表-1 掃流力の増加に伴う水理現象

Relative skin shear stress	η	small → > 1 → → → >> 1 → large
Sediment transport		0 → bed load → bed load and/or suspended load
Bed configuration of micro-scale		Flat → Ripples, Dunes → Transition → Flat → Antidunes
Relative roughness	ζ	1 → increase → maximum → decrease → ≈ 1 → >> 1

τ_*' と ξ で表わそうとするものである。このことから、式 (7) におけるパラメーターのうち、 τ_* は少なくとも τ_*' と ξ で表わせることになる。また、 F_r は恒等的に ξ , ζ , τ_* と関係付けられること、 R_o と B/R は、これらの値が比較的小さい流れにおいて重要であり、ここでは無視し得ること、および R_* あるいは d_* の効果は τ_{*c} を導入することにより間接的に反映できること、などの点を考慮すると移動床流れの相対粗度 ζ は ξ および η の 2 つのパラメーターで表わされ式 (9) となる。

$$\zeta = \text{func.}(\xi, \eta) \dots\dots\dots(9)$$

3. 既往資料の解析

本章においては、現地実験²¹⁾、模型実験^{22)~24)} および実際河川^{8), 11), 23), 25)~28)} で実測した既往資料 (2536 個) を収集し、 ζ と ξ との関係を解析した。

(1) 河床表面の粗・滑の判定

表面摩擦抵抗 (skin friction) に関する式 (2) により個々のデータを水理学的に粗面、あるいは滑面および遷移の二通りに分類した。このときの判定基準には次式を用いた。

水理学的に粗面：

$$d/\delta' = (1/11.6) u_*' d/\nu > 6 \dots\dots\dots(10)$$

水理学的に滑面および遷移：

$$d/\delta' \leq 6 \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 $\delta' = 11.6 \nu / u_*'$ は河床を平坦としたときの粘性底層の厚さである。

(2) 流砂の有無の判定

流れの抵抗則に関しては表-1 で示したように流砂の存在が大きく影響することから河床砂礫の移動限界を示す限界掃流力を知る必要がある。この限界掃流力は河床砂礫の粒度分布範囲が狭く比較的粒径が一樣である場合と、粒度分布範囲が広い混合粒径河床の場合とでは異なった傾向を示す^{9), 10)}。本研究では以下の式を用いた。

実際河川の中流部や下流部のように河床砂礫が比較的一様な粒径範囲にある場合には、限界掃流力公式として岩垣公式 (1956)²⁹⁾ が適用される。

一方、実際河川の上流部や山地河川における混合粒径河床においては、高山 (1965)³⁰⁾ や村本ら (1977)³¹⁾ により問題点の指摘がなされ、著者ら (1981)⁴⁾ により高瀬川現地実験結果²¹⁾ に基づいて定式化され

た混合粒径河床の平均粒径に対しての限界掃流力式 (文献 4) を参照) を用いる。平均粒径の限界掃流力値が算定されると Egiazaroff 型の公式により粒径別の限界掃流力を知ることができる¹⁰⁾。

(3) 解析結果

河床表面の水理学的な粗・滑および流砂の有無の判定を行った後、式 (5) の ξ と ϕ に実測値を代入して相対粗度 ζ を求めた。得られた ζ と ξ との関係を図示すると 図-2 のようになる。

図-2 からわかるように、収集されたデータは、 ξ のオーダーが $0(10^{-1})$ から $0(10^4)$ までの広範囲にわたっている。

次に、流砂が存在することおよび ξ が比較的大きいことから、移動床流れとみなせるデータのほとんどは次式の範囲に入っている。

$$\zeta \leq 0.5 \xi, \text{ または } k_s \leq 0.5 R \dots\dots\dots(12)$$

したがって、移動床流れの ζ の最大値は約 0.5ξ と判断される。

ところで、 ξ のオーダーが $0(10^{-1})$ から $0(10)$ と小さくて、 $\zeta \geq 0.5 \xi$ の範囲にあるデータは、流砂が存在しないことおよび ξ が小さいことから、流れが礫床流れとみなすことができる。したがって、移動床流れと礫床流れとの境界は、 $\xi \leq 0(10)$ に対して次式で表わされる。

$$\zeta \approx 0.5 \xi \dots\dots\dots(13)$$

以上のことより、礫床流れのデータの範囲は 図-2 に

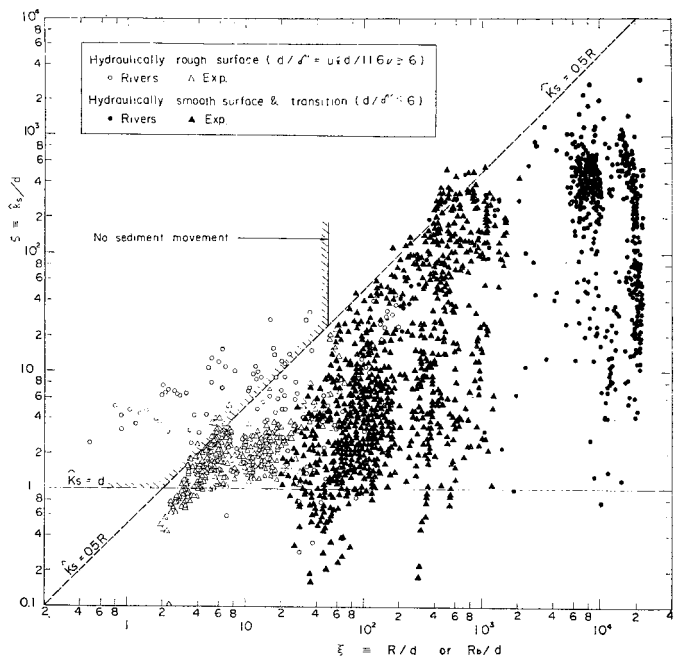


図-2 相対粗度 ζ と相対深 ξ

示したように次式で表わすことができる。

$$\zeta \leq 50 \text{ かつ } \zeta \geq 0.5 \xi \dots\dots\dots(13 \cdot a)$$

4. 移動床流れの抵抗則

(1) 相対粗度

本節においては前章で説明した式 (9) の具体的な関数形を求め、その式と 図-2 で示した既往資料のデータとの比較検討を行う。

表-1 および 図-1, 2 から、相対粗度 ζ の関数形を決める条件として以下のものが考えられる。ただし、以下の条件は $\eta \geq \alpha$ (α : 未知定数) に対してであり、 $\eta < \alpha$ のときは、流砂がなく、河床形態も平坦河床であることより、常に $\zeta=1$ であると仮定することができよう。この場合、対象としている流れは式 (12) で示される移動床流れであることに注意を要する。 $\eta < \alpha$ の移動床流れを式 (13・a) の礫床流れに関係付けるためには別のパラメーターが必要と思われるが、この点については今後の課題としたい。

- 1) $\eta = \alpha$ のとき $\zeta = 1$
ただし、定数 $\alpha < 1$ である。

この条件は、河床形態が形成される以前の平坦河床における条件であるが、 η が大きいときに形成された河床形態が η が 1 以下になったときにも消滅せずに残っている場合の履歴の効果を考慮したものである。

- 2) $\eta \rightarrow \infty$ のとき $\zeta \rightarrow 1$
 η がかなり大きくなると河床形態は Flat bed や Antidunes となる。この場合 ζ は 0(1) となるものと考えられるが、既往資料によると Antidunes において再び ζ が 1 以上に大きくなるという確証が得られなかったため上記の条件を設定した。

- 3) $\eta = \eta_p(\xi)$ のとき $\partial \zeta / \partial \eta = 0$, すなわち, $\zeta = \zeta_p(\xi)$
ここに, $\eta_p(\xi), \zeta_p(\xi) : \xi$ の関数。

この条件は、図-1 に示してあるように、 η が $\eta_p(\xi)$ のときに ζ が極大値 $\zeta_p(\xi)$ になるという条件である。この場合の河床形態としては、Ripples や Dunes が対応する。

- 4) $\zeta_p(\xi)$ については,
 $\xi = \text{small}$ のとき $\zeta_p \propto \beta \xi$,
 $\xi = \text{large}$ のとき $\zeta_p \rightarrow \tau$.
ここに, β, τ : 定数。

この条件は 図-2 から推定できるが、 $\eta_p(\xi)$ の関数形とともに後出のデータの示す傾向に基づいて $\zeta_p(\xi)$ を求めるものとする。

さて、条件 1), 2) を同時に満たす関数として Yalin (1978)²²⁾ の Dune steepness に関する研究を参考にし

て次式のようにおく。

$$\zeta = 1 + f(\xi)(\eta - \alpha) \exp[-g(\xi)(\eta - \alpha)] \dots(14)$$

ここに、 $f(\xi), g(\xi) : \xi$ のみの関数。

この関数は、 $Y \equiv \zeta - 1, X \equiv \eta - \alpha$ とおくと、関数 $Y(X) = f(\xi) X^m \exp[-g(\xi) X]$ ($m > 0$) において $m = 1$ としたときの形となっている。数学的には $X^m e^{-X} = X^m / e^X$ なる関数は、 m がいかに大きくとも $X \rightarrow \infty$ ($\eta \rightarrow \infty$) としたときには $X^m \ll e^X$ であり、また、 $X \rightarrow 0$ ($\eta \rightarrow 0$) としたときにも $X^m \ll e^X$ となり、結局両者とも $Y(X) \rightarrow 0$ ($\zeta \rightarrow 1$) なる性質を示し、条件 1), 2) を満足している。

Yalin の Dune steepness に関する研究²²⁾では、 $m = 1$ を用いている。本研究においても、河床波の波高が粗度長に直接寄与するという立場から、Yalin と同様の m 値とした。

次に、条件 3) より、関数 $g(\xi)$ が次式で表わされる。

$$g(\xi) = 1 / [\eta_p(\xi) - \alpha] \dots\dots\dots(15)$$

式 (15) を式 (14) に代入した後、 $\eta = \eta_p$ とおくと、

$$\zeta_p(\xi) = 1 + f(\xi) \{ \eta_p(\xi) - \alpha \} \exp[-1]$$

となり、この式から、関数 $f(\xi)$ は次式のように求まる。

$$f(\xi) = \frac{\zeta_p(\xi) - 1}{\eta_p(\xi) - \alpha} \exp[+1] \dots\dots\dots(16)$$

式 (15), (16) を式 (14) に代入することにより関数 $\zeta(\xi, \eta)$ は次式で表わされることになる。

$$\zeta(\xi, \eta) = 1 + \{ \zeta_p(\xi) - 1 \} \frac{\eta - \alpha}{\eta_p(\xi) - \alpha} \cdot \exp \left[1 - \frac{\eta - \alpha}{\eta_p(\xi) - \alpha} \right] \dots\dots\dots(17)$$

条件 4) を満たす関数 $\zeta_p(\xi)$ を次式で表わす。

$$\zeta_p(\xi) = \frac{\beta \xi}{1 + (\beta/\tau)\xi} \dots\dots\dots(18)$$

また、関数 $\eta_p(\xi)$ は 図-3 の傾向より、

$$\eta_p(\xi) = c_1 \log_{10}(c_2 \xi) \dots\dots\dots(19)$$

ここに、 β, τ, c_1, c_2 : 未知定数。

以上の諸式 (17), (18), (19) における未知定数 $\alpha, \beta, \tau, c_1, c_2$ のうち、 α については河床波の消滅時の履歴の効果を考慮して定めた。他の未知定数は 図-3 に基づいて定めた。図-3 は次のようにして作成したものである。

まず、図-2 における $\xi \geq 10$ の移動床流れのデータを対象として適当な ξ のバンド幅を設定し、このときデータ数およびデータの精度的な質 (グレード) を考慮に入れて使用する代表的な ξ のバンド幅を定めた。これが 図-3 にみられるように、9 通りのバンド幅である。

次に、 ξ のバンド幅ごとに、 $\zeta-\eta$ 図を作成し、この図

から ζ の極大値付近のデータの範囲 (ζ_p の幅) と、これに対応した η_p の幅を求めた。これらを 図-3 の網かけ部 (ζ_p) と右下り斜線部 (η_p) として示した。さらに、 η_p に関しては、 η に対してのデータの分布幅より η_p の取り得る範囲を推定した結果を右上り斜線部で示した。

このように 図-3 に示される ζ_p および η_p の取り得るデータの範囲に式 (18) と (19) を適用し、平均的な値を与えるように未知定数を決めたのが次式である。なお、 ζ_p の分布幅の上限を示すのが ζ の最大値 ζ_{max} であり、 $\zeta_{max} \approx 2.5 \zeta_p$ となる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha = 0.7, \beta = 0.2, r = 1000, \\ c_1 = 0.9, c_2 = 13.2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

したがって、移動床流れの相対粗度 ζ は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \xi \geq 10 \text{ の場合に,} \\ \eta \leq 0.7 \text{ に対して } \zeta = 1 \\ \eta \geq 0.7 \text{ に対して} \\ \zeta = 1 + \left\{ \zeta_p(\xi) - 1 \right\} \frac{\eta - 0.7}{\eta_p(\xi) - 0.7} \\ \cdot \exp \left[1 - \frac{\eta - 0.7}{\eta_p(\xi) - 0.7} \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \zeta_p(\xi) = \frac{0.2 \xi}{1 + (\xi/5000)} \\ \eta_p(\xi) = 0.9 \log_{10}(13.2 \xi) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21 \cdot a)$$

さて、式 (21) とデータとの比較を行うにあたり、図中で使用する記号を河床形態別に 表-2 のように定義する。

相対径深 ξ のある幅でデータを取り出し、式 (21) と

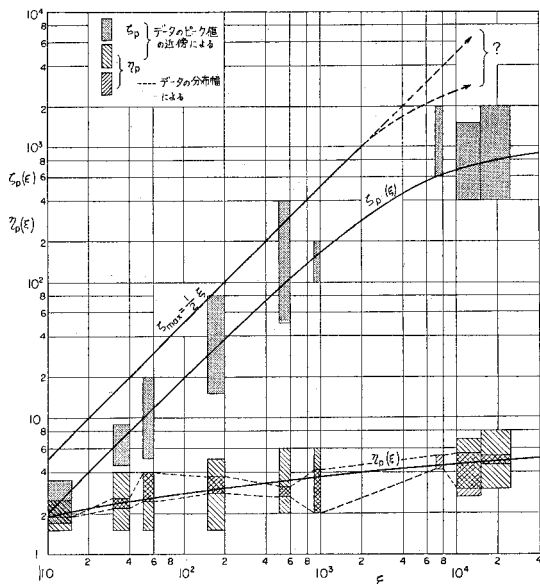


図-3 $\zeta_p(\xi)$ と $\eta_p(\xi)$ を決めるデータの傾向

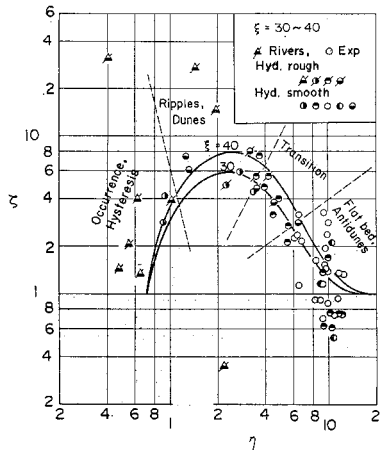
比較を行うと 図-4(a) ~ (d) のようになる。

これらの図面のうち、 図-4(a), (b) には 表-1 で示した傾向がかなり明確な形で現われていることがわかる。 図-4(c) においてもその傾向が読み取れる。式 (21) とデータとの一致の度合の点からみると、 図-4(a), (d) が非常によい一致をしているが、他の図では、データのばらつきが大きく必ずしもよい一致とはいえない。しかし、全体としては、式 (21) が移動床流れの抵抗則として十分実用に資するものであると考えられる。

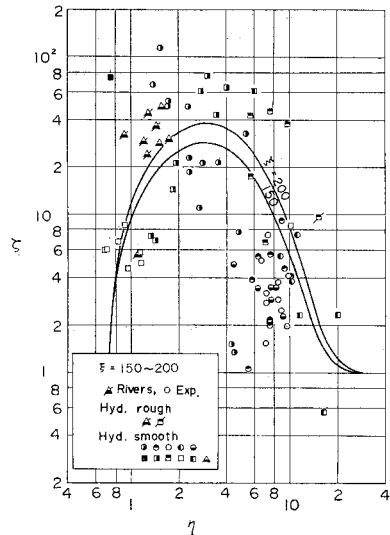
また、実際河川における洪水時などのように河床形態が不明の場合であっても、 図-4(a) を参考にすると式

表-2 記号の定義

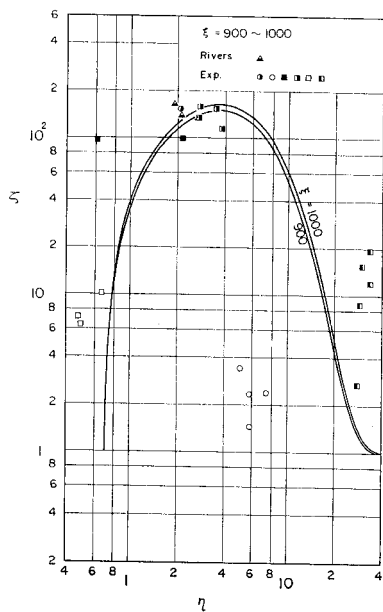
Notation	Bed configuration
■	Ripples
○ □	Dunes
● ▣	Transition
○ □	Flat bed
◐ ◑	Antidunes
◐ ◑ ▲	Uncertain



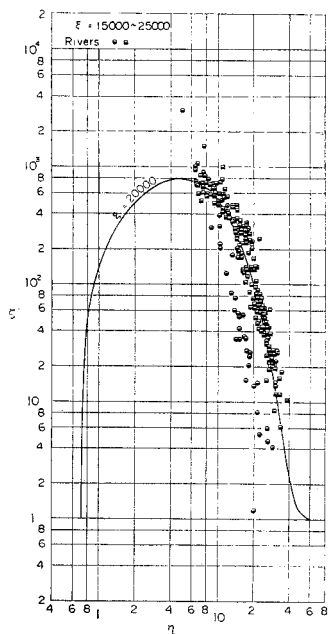
(a) $\xi = 30 \sim 40$ の場合



(b) $\xi = 150 \sim 200$ の場合



(c) ξ=900~1000 の場合



(d) ξ=20000 の場合

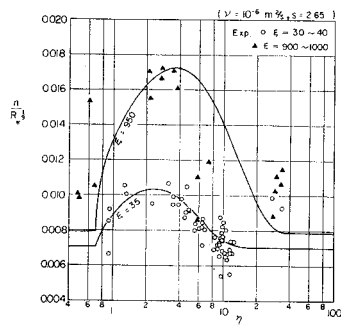
図-4 式(21)とデータとの比較

(21) により その時々 の 形成されるであろう河床形態を概略推察できる。

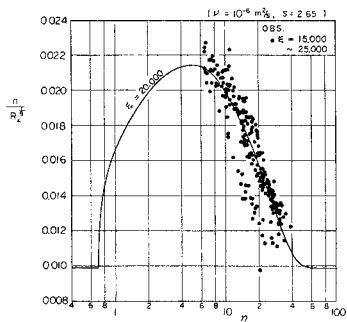
(2) Manning の粗度係数

式(6) で表わされる Manning の粗度係数 n を書き直すと次式のようになる。

$$n = \frac{1}{5.75} \left[\frac{\nu}{(s-1)^{1/2} g^5} \right]^{1/9} \frac{R_*^{1/9} \xi^{1/6}}{\log_{10}(12.27 \xi / \zeta)}$$



(a) ξ=35, 950 の場合



(b) ξ=20000 の場合

図-5 式(22)とデータとの比較

$$(m^{-1/3} \cdot s) \dots \dots \dots (22)$$

ちなみに、 $\nu = 10^{-6} (m^2/s)$, $s - 1 = 1.65$, $g = 9.8 (m/s^2)$, とおいて定数項を求めると、

$$(1/5.75) [\nu / \{(s-1)^{1/2} g^5\}]^{1/9} = 0.01025 (m^{-1/3} \cdot s)$$

となる。また、式(21)より、 $\zeta = \text{func.}(\xi, \eta)$ であるから、したがって、移動床流れの Manning の粗度係数 n は、

$$n = \text{func.}(R_*, \xi, \eta) \dots \dots \dots (22 \cdot a)$$

となり、砂粒子 Reynolds 数 R_* , 相対径深 ξ および相対有効掃流力 η の3つのパラメーターで構成されている。

ここで、式(22)の適合性をみるために、 $\xi = 35, 950$ についてデータと比較をしたのが 図-5(a) であり、また、 $\xi = 20000$ について比較をしたのが 図-5(b) である。これらの図をみてわかるように式(22)とデータとの一致の度合はかなりよいといえる。

5. 結 語

本研究により得られたおもな結果を取りまとめると以下のようなのである。

- (1) 従来の知見を総合すると、移動床流れの相対粗度 $\zeta (\equiv \bar{k}_s/d)$ の増減は、主として相対径深 $\xi (\equiv R/d)$ または R_b/d と相対有効掃流力 $\eta (\equiv \tau_*'/\tau_{*c})$, または

τ_{*b}/τ_{*c}) の 2 つのパラメーターにより支配されている。

(2) 既往資料の解析により、

1) 流砂が存在し移動床流れとみなせるデータのほとんどは $\zeta \leq 0.5\epsilon$ の範囲であり、 ζ の最大値は約 0.5 ϵ と判断される。

2) 相対径深 ϵ のオーダーが $0(10^{-1})$ から $0(10)$ のもので、 $\zeta \geq 0.5\epsilon$ の範囲にあるデータは流砂が存在せず、流れが礫床流れとみなせることから、移動床流れと礫床流れとの境界は、 $\epsilon \leq 0(10)$ に対して $\zeta \approx 0.5\epsilon$ で表わされる。

(3) 移動床流れの相対粗度 ζ は、 $\epsilon \geq 10$ に対して式 (21) で表わすことができる。

参 考 文 献

- 1) Chow, V.T. : Open-channel hydraulics, McGraw-Hill Company, Inc., 680 p., 1959.
- 2) 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, pp. 65~91, 1973.
- 3) 尾崎幸男・石橋 毅 : 移動床流れの抵抗則に関する研究, 土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集 II-153, pp. 302~303, 1980.
- 4) 尾崎幸男・石橋 毅・白砂孝夫 : 礫床河川における流れの抵抗則に関する研究, 土木学会第 25 回水理講演会論文集, pp. 21~28, 1981.
- 5) Simons, D.B., K.S. Al-Shaikh-Ali and R.M. Li : Flow resistance in cobble and boulder riverbeds, Proc. ASCE, Vol. 105, HY 5, pp. 477~488, 1979.
- 6) 日野幹雄・山田 正・川端規之・太田明彦 : 滑面・粗面および浸透層上の流れの抵抗則と乱れの構造, 土木学会第 24 回水理講演会論文集, pp. 285~291, 1980.
- 7) Onishi, Y., S.C. Jain and J.F. Kennedy : Effects of meandering in alluvial streams, Proc. ASCE, Vol. 102, HY 7, pp. 899~917, 1976.
- 8) Bathurst, J.C. : Flow resistance of large-scale roughness, Proc. ASCE, Vol. 104, HY 12, pp. 1587~1603, 1978.
- 9) 平野宗夫・岩元 賢 : 混合砂礫床の粗度について, 新砂防, 113, pp. 17~21, 1979.
- 10) 林 泰造・尾崎幸男・石橋 毅 : 混合砂礫の掃流砂量に関する研究, 土木学会第 24 回水理講演会論文集, pp. 35~43, 1980.
- 11) Bray, D.I. : Estimating average velocity in gravel-bed rivers, Proc. ASCE, Vol. 105, HY 5, pp. 1103~1122, 1979.
- 12) Einstein, H.A. : The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, Technical Bulletin No. 1026, U.S. Dept. of Agric., Washington, D.C., 78 p., 1950.
- 13) 志村博康 : 浮遊砂を有する水流の諸特性について, 土木学会論文報告集第 46 号, pp. 22~29, 1957.
- 14) Kennedy, J.F. : The mechanics of dunes and antidunes in erodible bed channel, J. of Fluid Mech., Vol. 16, pp. 521~544, 1963.
- 15) Hayashi, T. : Formation of dunes and antidunes in open channels, Proc. ASCE, Vol. 96, HY 2, pp. 357~366, 1970.
- 16) Fredsøe, J. : On the development of dunes in erodible channels, J. of Fluid Mech., Vol. 64, pp. 1~16, 1974.
- 17) 白砂孝夫 : 移動床水路における河床形態の形成機構に関する研究, 京都大学学位論文, 51 p., 1974.
- 18) 林 泰造・大西光陽 : せん断流モデルによる 2 次元河床波発生理論的研究, 土木学会第 25 回水理講演会論文集, pp. 85~92, 1981.
- 19) Engelund, F. : Closure to "Hydraulic resistance of alluvial streams", Proc. ASCE, Vol. 93, HY 4, pp. 286~296, 1967.
- 20) 林 泰造・矢内栄二 : 砂堆の波形勾配及び掃流砂量について, 土木学会第 24 回水理講演会論文集, pp. 323~328, 1980.
- 21) 石橋 毅・磯部明久 : 高瀬川上流部の土砂流出に関する研究 (第 1 報), 電中研依頼報告 No. 70521, 1970.
- 22) Gilbert, G.K. : The transportation of debris by running water, U.S. Geol. Survey Prof. Paper, 1914.
- 23) Vanoni, V.A. and N.H. Brooks : Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams, Rep. No. E-68, Sedimentation Laboratory, California Inst. of Tech., Pasadena, California, 1957.
- 24) Guy, H.P., D.B. Simons and E.V. Richardson : Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61, U.S. Geol. Survey Prof. Paper 462-I, 96 p., 1966.
- 25) Shinohara, K. and T. Tsubaki : On the characteristics of sand waves formed upon the bed of the open channels and rivers, Rep. of Research Inst. for Applied Mech., Kyushu Univ. Vol. VII, No. 25, pp. 15~45, 1959.
- 26) 山本晃一 : 相似律の観点から見た移動床流れの水理(III), 建設省土研資料第 1154 号, 1976.
- 27) Shen, H.W., W.J. Mellema and A.S. Harrison : Temperature and Missouri River stages near Omaha, Proc. ASCE, Vol. 104, HY 1, pp. 1~19, 1978.
- 28) Thompson, S.M. and P.L. Campbell : Hydraulics of a large channel paved with boulders, J. of Hydraulic Research, Vol. 17, No. 4, pp. 341~354, 1979.
- 29) 岩垣雄一 : 限界掃流力に関する基礎的研究 (I) 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集第 41 号, pp. 1~21, 1956.
- 30) 高山茂美 : 新潟県海府浦付近の溪流河川の流送土砂礫に関する研究 (第 1 報), 地理学評論, pp. 29~41, 1965.
- 31) 村本嘉雄・河田恵昭・布村明彦 : 砂礫河川の掃流砂に関する基礎的研究, 京大防災研年報第 20 号 B-2, pp. 451~474, 1977.
- 32) Yalin, M.S. : On the influence of flow depth on dune geometry, "Application of Stochastic Processes in Sediment Transport" edited by Shen, H.W. and Kikkawa, H., Water Resources Publications, Appendix B, 1978.