

京都大学防災研究所 正員 芦田 和男

京都大学防災研究所 正員 道上 正規

1. 緒言

移動床流れにおいては、水流と砂礫の特性に応じて種々の河床形態が形成されるが、それぞれの領域ごとに抵抗特性が顕著に相違する。しかしながら、従来の流れの抵抗に関する研究では、次元解析的方法によって抵抗の算定を試みたものは数多くみられるが、河床形態との有機的な関連において抵抗を議論したものはほとんどみられない。いま、移動床流れの系を模式的に表示すると、図-1のよう書くことができ、これらの間には強い相互作用が働き、閉じた系を形成していると考えられる。したがって、移動床流れにおいて生起する現象—たとえば流砂現象や河床波の発生など—はこの抵抗特性を考えずに議論されえない。さらに、計画洪水流量から計画高水位を決定する場合、とくに無資料河川においては、このような河床粗度の算定が重要になってくる。

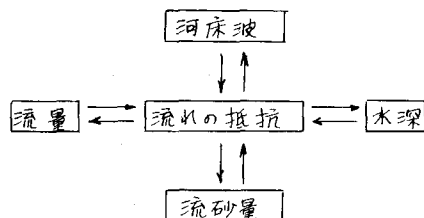


図-1 移動床流れの系

以上述べたような流れの抵抗は河床形態と密接な関連にあると考えて、まず各領域の河床形態に関して現象論的考察を加え、抵抗を評価する際の基礎とする。ついで、抵抗算定のための河床形態の分類を行ない、それぞれの領域の抵抗則を次元解析的に検討して、抵抗算定法を提案しようとするものである。

2. 河床形態と抵抗の関連に関する現象論的考察

移動床における断面平均流速 U に関与する物理量は、砂礫および流体の特性と水路幾何学的な特性量であるので、等流の平均流速は次式の物理量で表わされる。

$$U = F_2(\mu, \sigma, \rho, d, g, R, I) \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 μ : 流体の粘性係数、 σ, ρ : それぞれ砂および流体の密度、 d : 砂の粒径、 g : 重力加速度、 R : 径深、 I : 水路こう配である。いま、(1)式を従来よく用いられている物理量で書くために、 I の代りに $U_* = \sqrt{gRI}$ を用い、また g の代りに砂礫の水中重量 $(\sigma - \rho)g$ を用いることにする。次元解析の基本量として、 μ, U_* および d を選んで次元解析を行なうと (1)式は次式のように書ける。

$$\frac{U}{U_*} = F_2\left(\frac{U_* d}{\nu}, \frac{U_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd}, \frac{R}{d}, \frac{\sigma}{\rho}\right) \quad \text{----- (2)}$$

砂礫が移動していない状態では、(2)式で示す R/d が粗度要素の尺度として用いられることは、固定床砂粒粗面の流れの実験からすでに明らかな事実であるが、砂礫が移動して河床波が形成されると、もはやこの尺度は粗度要素を表わすものとはなりえない。したがって、河床波が形成された流れにおいては、河床波の形状を粗度要素の尺度として導入する必要があるが、河床波が流れの状態によって変化することを考慮して、この尺度を導入する代りに河床形態の領域区分図を併用して、(2)式の R/d

×-ターで流れの抵抗を考察することをした。

水流の流速分布に対数則が適用できるとすれば、流れの抵抗は次のように表わされる。

$$\frac{U}{U_*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{k_s} \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 k_s : 相当粗度であり、上式の右辺の定数は砂遊砂などによるカルマン定数の変化を無視している。

流れの抵抗が各河床形態によってどのような性状を示すかを現象論的に考察するとつぎのようである。

i) Ripple Bed : Ripple のスケールは砂粒の粒径にほぼ比例することから実験資料の検討^{わ5)}から明らかにされているので、相当粗度は Ripple のスケールに比例するとして、

$$k_s \sim d \quad \text{----- (4)}$$

のように表わされることを期待される。また、そのスケールの発達程度は掃流力によっても当然規定されるので、(2)、(3)および(4)式から、 U/U_* は $\tau_* (= U_*^2 / (\sigma/\rho - 1)gd)$ と R/d の関数で表示されるであろう。この場合、 U/U_* への R/d の寄与は τ_* の全範囲にわたるものと考えられる。

ii) Dune Bed : Dune のスケールは、それが十分に発達した状態では、水深あるいは径深にほぼ比例するので、この領域における k_s は、

$$k_s \sim R \quad \text{----- (5)}$$

の関係で表わされる。(5)式を(3)式に代入すると、Dune が十分発達した状態では、

$$U/U_* = \text{一定} \quad \text{----- (6)}$$

の関係がえられ、次節で述べるようにこの一定値は約8前後の値となる。また、このスケールの発達程度も掃流力によって変化するとともに、とくに砂礫の移動限界付近においては、固定床砂粒粗面とほぼ同様な性状を示すので、 U/U_* は τ_* と R/d の関数で表示されよう。ただし、この河床形態では、Ripple の場合と相違して、 R/d が U/U_* に寄与する範囲は砂礫の移動限界付近に限られると考えられる。

iii) Flat & Antidune Bed : これらの河床形態では、フルード数も大きく、流れが河床から剥離しないために、流れの抵抗は小さくなる。したがって、この領域では流砂の移動の影響も考慮した表面抵抗が用いられる。いま、移動している砂粒の粒子速度を U_s とすれば、衝突によるその飛行高さは、

$$H_s \sim \frac{U_s^2}{(\sigma/\rho - 1)g} \quad \text{----- (7)}$$

のように表わされるものと仮定し、かつ $U_s \sim U_*$ として、平坦河床の場合の k_s を求めると次式のようなになる。

$$k_s = d + \alpha H_s = d(1 + \alpha \tau_*) \quad \text{----- (8)}$$

ここに、 α' , α : 比例定数である。一方、芦田²⁾は平坦河床に関する従来の実験資料を整理して、

$$k_s = (0.5 \sim 4.0) d_m \quad \text{----- (9)}$$

の関係をえている。上式の値を考慮して、 $\alpha=2$ を仮定すれば、(3)および(8)式から、

$$\frac{U}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{d(1+2\tau_*)} \quad \text{----- (10)}$$

のようにこの領域の U/u_* が与えられる。⁶⁾

3. 流れの抵抗算定法

河床波の発生機構に関しては、安定理論に基づく数学的解析が従来なされてあり、^{7),8)} これによると河床波の安定にとっては、フルード数が重要な物理量である。したがって、ここでは安定理論に基づいて得られた結果を参考にして、 $Fr=0.8$ を境界に河床形態が相違するものと考え、資料を(2)式のパラメーターで整理した結果、図-2の領域区分図を得た。ここで、(2)式のパラメーターの中で σ/p を用いていないのは、対象としている現象において、 σ/p が一定であると考えていることによる。なお、ここで用いた資料は土木学会水理委員会移動床流れの粗度と河床形状研究小委員会⁹⁾で収集されたものおよび Gilbert⁹⁾の実験資料である。

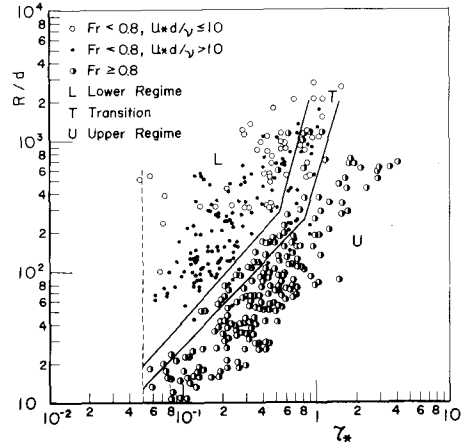


図-2 河床形態の領域区分図

図-2 は従来のような各研究者の観察結果に基づいて定義された河床形状で河床形態を区分したものではなく、上記のフルード数によって領域区分図を τ_* と R/d の平面上に作成したものである。この図において、Lower Flow Regime には、Ripple と Dune が共存するが、両者を区分する物理量として、 $U_* d/v$ が用いられる。ここでは、i) $U_* d/v \leq 10$ のときの河床波を Ripple とし、ii) $U_* d/v > 10$ のとき Dune と定めた。したがって、流れの河床形態を予測するには、図-2 を用いて、対象としている河床形態が Lower か Upper のどちらに属しているかを判定し、それが Lower Regime の場合には、Ripple と Dune の区分が $U_* d/v$ によって簡単に行われる。また、図-3 に示すように、著者らの領域区分図は Garde・Ranga Raju¹⁰⁾によって提案された区分図と類似しているが、誘導過程においてはかなり相違している。しかし、両者におけるパラメーターは流速に直接関係するパラメーター(たとえばフルード数など)が陽に入っていないので、流れの抵抗を算定するための領域区分図としては非常に有用なものである。つぎに、河床形態の区分図が作成されたので、各河床形態の流れの U/u_* の関数形を決定することにする。

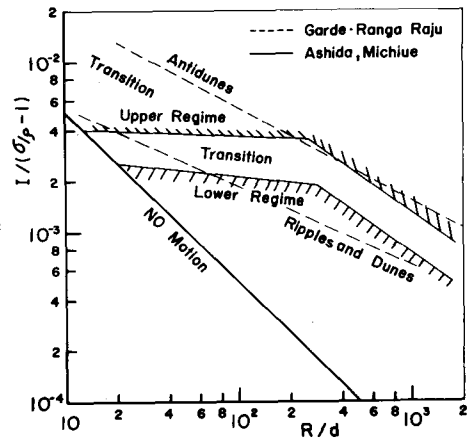


図-3 Garde・Ranga Raju と著者らの領域区分図の比較

図-4 は Ripple Bed 上の流れの抵抗を示したものであって、資料にはかなりの散点がみられるが、図中の実線はその資料の平均的な値である。これから掃流力の増加に伴って、 R/d をパラメーターにして、河床波の発達および崩壊の過程が推察される。また、 U/u_* と τ_* の関係は、 R/d によって相違した関数形を示す状況がこの図から理解され、前節の現象論的考察で述べたように、Ripple ではそのス

ケールが粒径に依存していることを示していると言えよう。したがって、 R/d が非常に大きい実河川の資料にこの図を適用する場合には、 R/d によって U/α_* と τ_* の関係が変化することを注意しなければならぬ。砂の移動限界のところでは、(3)式において $k_s = 2d$ とし U/α_* を算定している。(なお、 d は平均粒径を用いている)

図-4は Dune Bed の場合の流れの抵抗を表示したもので、ここでも河床波の発達・崩壊過程が τ_* の増加とともに現われている。抵抗が最も大きくなるころは $\tau_* = 0.4 \sim 0.6$ 付近である。この領域では、 U/α_* の関数形は、砂礫の移動限界付近を除いて、 R/d に独立に決定される。したがって、ここで示した関数形は、移動^{限界}付近を除けば、スケールに独立に成立し、相似則を満足すると考えられる。

図-6は Upper Flow Regime の流れの抵抗を示したものであって、(10)式で計算された図中の曲線と実験値はほぼ一致していることから、抵抗の算定には、(10)式が適用できると考えられる。

一方、Transition の領域においては、Lower と Upper Flow Regime の中間的抵抗特性を示す場合や両者のどちらかを示す場合などが想定される。

4. 結語

以上、河床形態の領域区分図とそれに基づいた抵抗の算定法を現象論的考察によって述べ、かつその方法を提示したが、このような考え方は実河川の資料を整理する際にも有用なものとなりうるであろう。さらに、今後は混合砂礫床の流れの抵抗についても検討していかなければならない。

参考文献 1) 橋・古屋：流砂ある河川の流速法則について、九大流体力学

研究報告、7-4、昭27。2) 芦田：河道の設計法(4)、土木技術資料、1-7、昭34。3) 吉川・福岡：Characteristics of Open-Channel Flow with Sediments, Dept. Civil Eng., Tokyo Inst. Technology, Tech. Rept. No. 10, 1971。4) Yalin: Geometrical Properties of Sand Waves, Proc. ASCE, HY 5, 1964。5) 水理委員会 移動床流れの粗度と河床形状研究小委員会：移動床流れの河床形状、第16回水講演、昭47。6) 芦田・道上：移動床流れの抵抗と推移砂量に関する基礎的研究、土木学会論文集、(投稿中)。7) 橋・齊藤：流れによる Sand Waves の発生限界、九大工学集報、40-5、1967。8) 林：三河川蛇行の成因についての研究、土木学会論文集、180、1970。9) Gilbert: The Transportation of Debris by Running Water, U.S.G.S., Paper 86, 1914。10) Gonde-Ranga Raju: Regime Criteria for Alluvial Streams, Proc. ASCE, HY 6, 1963。

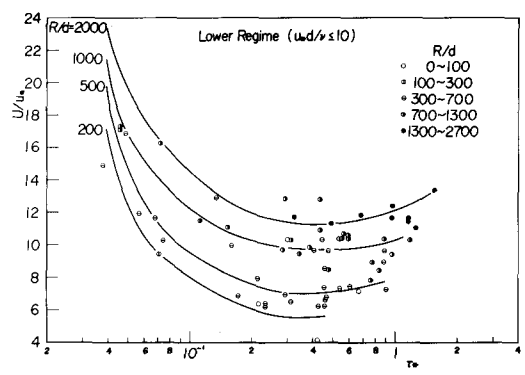


図-4 Ripple Bed 上の抵抗

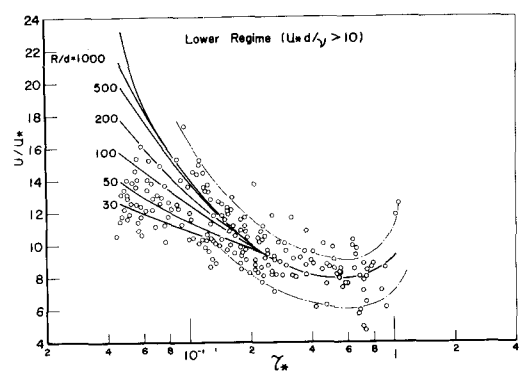


図-5 Dune Bed 上の抵抗

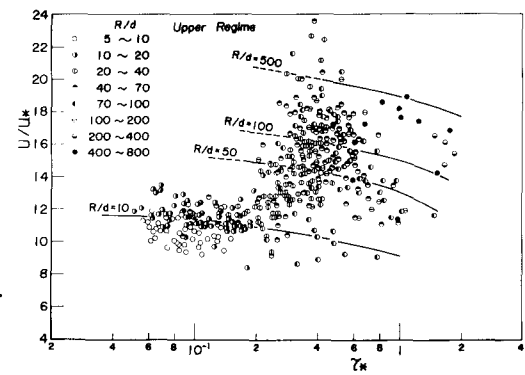


図-6 Upper Flow Regime における流れの抵抗の理論式と実験値の比較