

河川の粗度係数推定法に関する考察

建設省土木研究所 正員 土屋 昭彦

〇馬場 洋二

要旨 いわゆる無資料河川の粗度係数推定法について、芦田氏の方法に沿って、建設省所管河川のうち、測定精度が比較的良好と考えられる68ヶ所の観測所の実測データ(計1,774個)を用いて検討したもので、実験水路のデータとも比較することにより、こう配が比較的ゆるく径深の大きい実河川の粗度の特性を、推定した河床形状との関連において考察し、いわゆるTransition領域が発生しにくいこと、また掃流力が河床材料の限界掃流力を相当上まわるまで、砂粒に支配された抵抗則になることなどを認め、実河川へ芦田氏の方法を適用する際の修正を試みたものである。

1. まえがきと従来の研究

著者らは建設省技術研究会の一員として、全国河川の粗度係数について広範囲の検討をしてきたがそのうち無資料河川の粗度推定法に関しても実測値をもとに検討する機会を得た。その結果従来の多くの諸公式はともに一長一短があり、実測値をうまく説明できないところがかかなり有り、実測にともなう測定誤差のみに原因するものでもないようなので、いまだ少し詳しく検討する必要が生じた。

移動床の抵抗法則は一般に

$$\frac{\bar{U}_m}{\bar{U}_*} = Ar - \frac{1}{K} + \frac{1}{K} \ln \frac{R}{ks} \dots\dots\dots (1)$$

の形でよく表現できることが知られている。ここに慣用記号を用いてあるので記号の説明を略する。上式の相当粗度 ks は水路境界の粗さの程度を示すものであるから、従来の研究は ks と水理量との関係を河床材料の平均粒径 dm と結びつけ、 ks/dm という量が $\tau_* = \bar{U}_*^2/(s-1)gdm$ のみの関数とした研究(ここに s は土砂の水中比重、 g は重力加速度)、 τ_* と Fr (フルード数)とに関係するとした研究、 τ_* と dm および τ_* と浮遊砂濃度に関連付けた研究などに大別される。

2. 著者らの研究

著者らは同様に、実測の平均流速 $\bar{U}_m$ 、水面こう配 I および径深 R を使用し、カルマン定数 K は無資料河川にあっては浮遊砂濃度や Fr によって変化させるべきではないかと考えて、 $K=0.4$ の一定値をあたえ、また $Ar=8.5$ とした。こうして求められる相当粗度 ks について考察した。主要な変数は従来の次元解析から判明しているの、砂の動きやすさの程度を表わす d_{50}/RI (ここに d_{50} は河床材料の50%粒径)と、河床形態の領域区分に重要な Fr 、 I および有次元量の d_{50} を考慮した。検討した実河川の砂粒レイノルド数 $= \bar{U}_* d_{50}/0.01$ の値は、20以下のものが5個、残りは $10^2 \sim 10^5$ のオーダーの範囲にあった。

実河川の観測データは種々の測定誤差を持ち、また縦横断的な水路境界の不整正の影響を受けるため計算値がバラつきやすい。そこで従来の多くの観測所のデータを吟味して、粗度係数の値もしくはその傾向が比較的そろっている観測所のみを取り出して今回の検討の対象とした。

いま(2)式で表わされる無次元数 $f(\tau_*)$ を考える。左辺の $f(\tau_*)$ は、一定の d_{50}/RI に対して

平均値を取るかどうかの違いはあるが、ほぼ芦田氏の提案した $f(\tau_*)$ と同じである。関数 $f(\tau_*)$ は掃流力が大きくなると ks/d_{50} の値の増大のため増加するが、限界掃流力以下あるいは transition の領域の一部では $ks \approx d_{50}$ となるので減少し、 $f(\tau_*) \approx Fr^2$ に漸近する性質を有する。なお山岡

$$f(\tau_*) = \frac{ks}{d_{50}} \cdot Fr^2 \dots\dots\dots(2) \qquad f(\tau_*) = \frac{(\bar{u}_m/\bar{u}_*)^2}{(R/ks)} \cdot \frac{RI}{d_{50}} \dots\dots\dots(3)$$

氏¹⁾にならうと(2)は(3)のように変形できるので $d_{50}/RI =$ 一定に保った場合でも、 $A = (\bar{u}_m/\bar{u}_*)^2 / (R/ks)$ の値の変化範囲に応じて $f(\tau_*)$ が変化する。この変化は物理的な意味を有しないから、 A の平均値 $\bar{A}$ を採用することには危険がある。なぜなら河床形状の regime に無関係に(1)式で表わそうとしているから、最悪の場合には ripple や dune の regime の場合と他の transition などの場合の ks とを平均化してしまう恐れがあるからである。 ks/RI の場合でも $ks/RI = A \cdot Fr^{-2}$ となるから注意する必要がある。

上のような危険を避けるため、ここでは(2)式の整理と同時に Yalin²⁾の方法により砂粒支配の掃流力 τ' (全河床を d_{50} の砂が有効に覆っていると仮定)と全掃流力 τ との比 τ'/τ を、 d_{50}/RI との関連において相互に検討しながら前述 A の値の平均値を求めることにした。なお A の値は通常の範囲では図-1のような範囲の値をとる。¹⁾

図-2(a)は比較的粒径の細い観測所の $f(\tau_*)$ と d_{50}/RI の関係、図-2(b)は同じく τ'/τ と d_{50}/RI の関係を示したものである。図-3(a), (b)は粒径が 1 ~ 2 mm の観測所の例、図-4(a), (b)は粒径の粗い河川が多くなっているが、主たるデータの水面こう配がすべて 1/500 以上となる急こう配の観測所の例である。

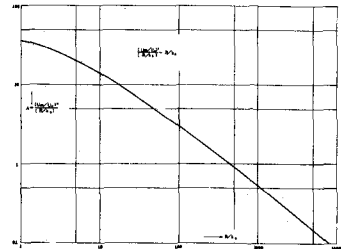


図-1

図-2, 3および4を検討する前に河床材料の限界掃流力状態および transition の発生する領域の d_{50}/RI の値について検討しておこう。

限界掃流力に関する岩垣公式より土砂の移動限界時の d_{50}/RI の値は図-5のようになり粒径によって異なる。本報告に使用した観測所等の粒径範囲は同図に示した通りであり、平均的には $d_{50}/RI \approx 14$ 程度で土砂が移動を始める。しかし砂れんなどの河床形状が発生する掃流力は限界掃流力よりいく分大きく目であることがすでに杉尾氏³⁾などの研究のなかに見られるし、平均粒径 d_m は普通には d_{50} より大きい。ため指標に使用した d_{50} が小さ目のきらいはある。粒度の混合状態によっては大粒径のしゃへい効果によって、上の $d_{50}/RI \approx 14$ の値はさらに小さくなる可能性がある。

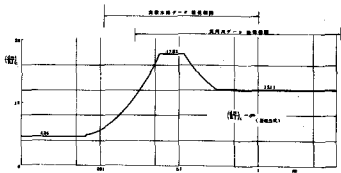


図-5

実河川の場合にはまた、流量の増減(掃流力の増減)により河床形状形成の遅延、あるいは逆に河床形状の残存する場合がある。この影響は $f(\tau_*)$ の値の大小の変化範囲が広くなることに相当する。実験室において長時間の通水により河床形状を十分平衡状態に達せさせた場合の水理量とは異なる面もでてくると思われる。

つぎに河床形態が transition になると、それまで減少していた τ'/τ の値が次第に増加し、

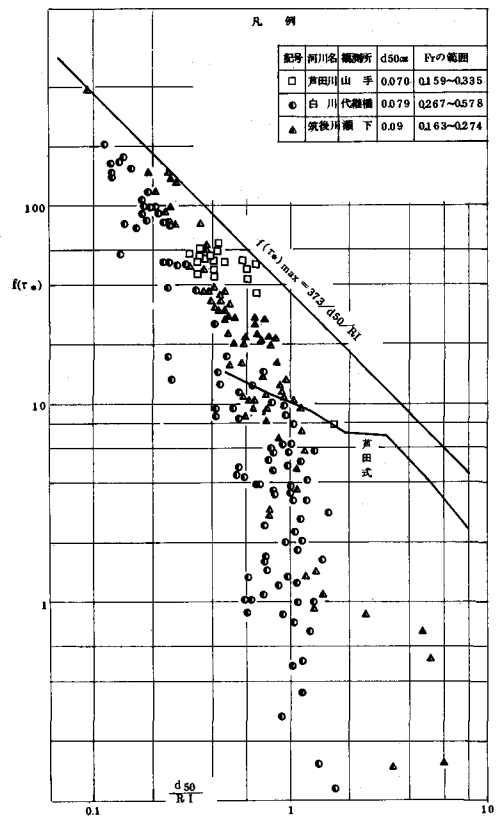


図 - 2 (a)

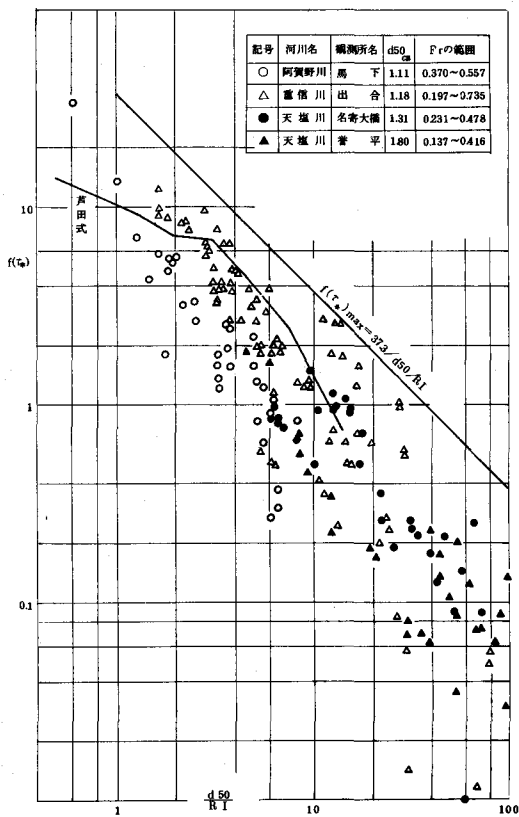


図 - 3 (a)

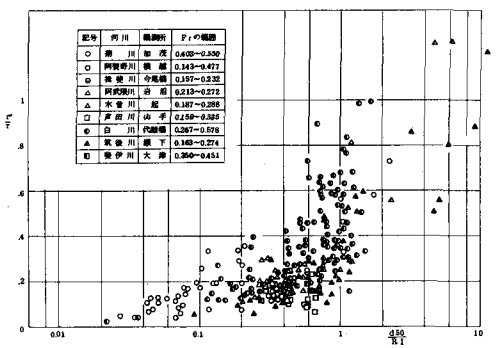


図 - 2 (b)

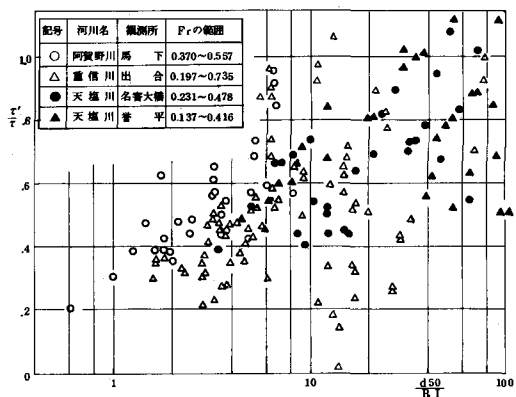


図 - 3 (b)

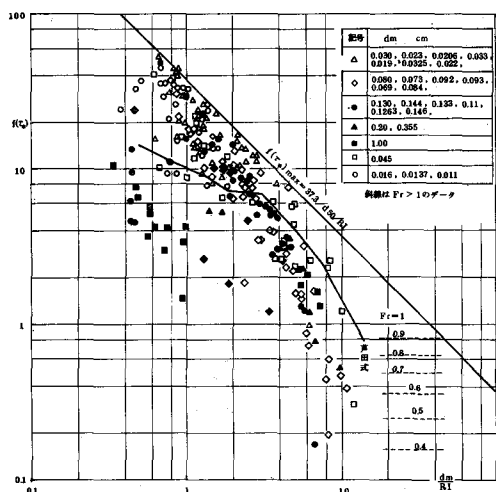


図 - 6 (a)

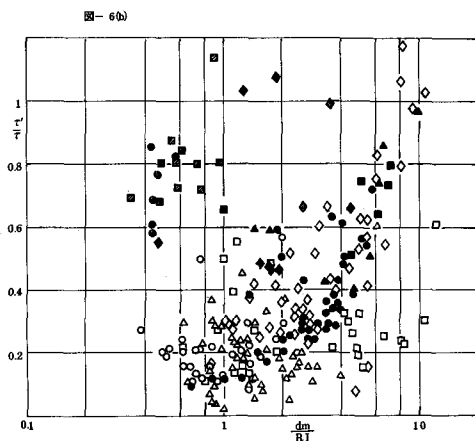


図 - 6 (b)

えるのが自然であるが、そうすれば τ'/τ の値が大きすぎる。逆に transition の領域だと考えると、図からも分かるようにフルード数が小さすぎる。

図 - 3 (a)(b)では、流水の抵抗を砂粒が支配する状態と河床形態とが支配する状態の境界が明瞭でなく、掃流力とともに連続的な変化を見せているようである。そしてむしろ粒径の大きさによる著しい差が生じていることが明瞭である。

図 - 4 (a)(b)は急こう配観測所であるが、抵抗の急激な変化は全体としては目立たないが、各粒径毎には、一定の傾向を持っていると思われる。

以上いくつかの観測所における粗度の変化を調べたが、河床材料の大きさと表わされる粗度となる時の d_{50}/RI の値が粒径毎に異なる傾向であり、また transition の発生しにくいことなどが推定されたが、その原因についてはよく分からない。そのため実験水路におけるデータを同様な整理を試みたのが図 - 6 (a)(b)である。(a)図に、 d_m/RI の値が 3.4 以下で、左下方に他と傾向を異にする一団のプロット (●, ◻, ◆印など) が見られる。この領域 $d_m/RI = 3.4 \sim 0.3$ は Yalin や山岡氏の考えている transition の領域にあたり、 Fr もすべて 1 以上のデータであり、 I は $1/200 \sim 1/80$ という水理量になっている。この領域では transition と他の河床形態とが、同一の d_m/RI に対して共存しているようであり、同時に、図 - 2 (a)(b) の観測所の粒径のものまで、図 - 2 のような $d_m/RI = 0.6 \sim 1$ 付近における粗度の落ち込みが見られず、他の 1 cm 程度の粒径のものと同様な動きをしている。そこでふたたび実河川のデータについて、最大流量規模程度のデータのみをピックアップして同様な整理を試みたところ (図省略)、図 - 2, 3 および 4 に見られる粒径の効果がいく分薄れることが分かった。またそうしたデータのプロット点は、 τ'/τ の小さいデータは図 - 6 (a) と非常によく一致する傾向となったがまだ粒径の効果が残存する。また τ'/τ の比較的大きい transition と考えられるデータは明瞭には出てこなかった。

以上の検討により、実河川で径深が大きいのために掃流力の大きくなっている観測所でも、そのよう

な場所は一般にフルード数が小さいため transition の領域以上には達しないのであろうと推定され、また図-2, 3 および 4 に見られる粒径別のかなり大きな違いは、大流量のみのプロットを行なうとそれが緩和されることから、測定誤差（小粒径の観測所は一般に I が小さく測定誤差が大きくなる）や断面形の不整（小粒径観測所は大粒径の観測所よりむしろ断面形が整正だと思われるが）を量的に評価した上で粒径の効果（たとえば浮遊砂濃度など）を突き詰めてゆく必要があると思う。

3. まとめ

実河川のデータから、河床に transition が発生しないものと考え、また既往最大流量のみのプロットでなお残存した粒径の効果を考慮に入れて芦田氏の粗度推定法に修正を加えたものが図-7である。これらのことより、椿・古屋氏⁶⁾や須賀氏⁷⁾が実河川データを τ_* のみで整理できた理由が、transition の発生がないものと考えればよく理解される。なお図-7の②の曲線は、いわゆる lower regime における実験水路には良く適用できると思われ、同様に実河川の種々の粒径に対してもかなりの精度での粗度の推定値をあたえ得ると考えられる。

なお相当粗度 k_s は、ripple の領域では河床材料の粒径に関係するが、dune になるとむしろ水深に支配されるようになるといわれているので、ここで検討した k_s/d_{50} の整理は最善の方法ではないとされている。今後こうした点についても研究を進めたいと考えている。また τ/τ_c の減少をただちに河床形状に原因させた点にも論理の飛躍があると思われるが、実河川の複雑な粗度要素を明確に表現する方法が早急に望まれる。

この報告に利用した実河川データは建設省技術研究会のものであり、また実験水路のデータは土木学会水理小委員会所属のデータを

利用させていただいた。また本研究をまとめるにあたり、東工大水理研究グループより貴重な御教示をいただき、電算および図面作成には河川研究室の本間、矢ヶ崎、佐々木各技官の手を煩わせた。合わせて深謝申し上げる。

参考文献 1. 山岡, 河床上の矩形粗度が水路の抵抗に及ぼす効果の研究, 土木試験所報告第27号昭37.3, 2. Yalin, M.S., On the average velocity of flow over a movable bed, LA HOUILLE BLANCHE, No. 1, 1964, 3. 杉尾, 移動床をもつ流れの水路床状態の区分について, 土木学会論文集第71号, 昭35.11, 4. Garde, R. I. and M. L. Albertson, Sand waves and regimes of flow in alluvial channels, Proc. IAHR, Vol. 4, 1959, 5. 椿, 渡辺, 定村, 砂礫堆の形成について, 第26回年講, 1971, 6. 椿, 古屋, 流砂ある河川における流速公式について, 九大流体力学研究所報告第7巻4号, 1951, 7. 須賀, 河川の粗度に関する雑考, 土木技術資料, 第7巻6号, 1965, 8. 芦田, 河川の粗度 ~~推定~~ ^{技術}について, 土木 ~~研究所~~ ^{技術}資料 Vol.1 No.7 1959.

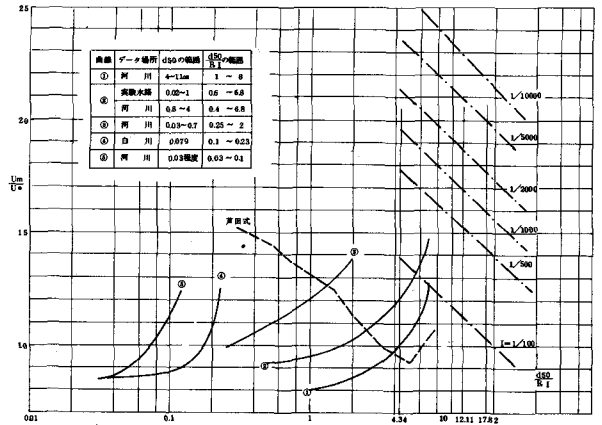


図-7