

移動床水路の抵抗係数について

大阪産業大学 工学部 正員 重光世洋

" " 正員 〇宮島昌弘

建設省近畿地方建設局 正員 梅敷 寛

1. まえがき 移動床水路の流水抵抗を記述する変数または因子は多種多様で、かつ非常に複雑であるため、それらの主な変数を含んだ流水抵抗を表現しえる普遍的な式がいまだに確立されていないのが実状である。現在までに移動床水路の流水抵抗の推定に用いられている数多くの接近法について分類すると、概ね次に示す2つのカテゴリーに分けることができよう。その1つは水路床を固定床として取扱って処理する方法と他の1つは移動床そのものを取扱って処理する方法の2つに大別される。後者のほとんどは対数式の形である。これは二相流現象を表現する式に対して計算する際に煩雑であり、かつ各種因子を含むために一般化することの難しさによるものであろう。本文は前者のカテゴリーである移動床を固定床として扱い、各種河床形態に対しての抵抗が推定できる普遍的な表現式を求める方法について既存の固定床水路に対する表現式を利用して考察した二、三の結果について報告する。

2. 表現式について 表現式の展開にあたっての主な考え方としては、まず移動床流れの条件を規定または支配する変数を見出すことである。これらの変数は少ない程良いので、できうれば二、三の変数で流水の抵抗と河床形態の両者が同時に規定できるものが望ましい。河床形態を予測する方法は既に多くの研究者によって各種異った接近法により提案されているが、本研究ではまず河床形態を大きく Lower Regime (Ripples, Dunes), Transition 及び Upper Regime の3つに区分した芦田・道上¹⁾の方法を用いる。また、流水抵抗の評価に用いる基本式は固定床水路に応用した Prandtl-von Kármán の対数流速分布則を対象とする。この流速分布則は比較的単純に表現できるので、これを移動床流れのものに修正して取扱う。なお、流れは定常等流でかつ粗面乱流領域のものを対象とする。浸透層の存在がない場合の平均流速 U の基本式は一般に次のように書き表わされる。 $U/U_* = E + \frac{1}{\kappa} \ln(R/k_s)$ — (1) ここに U_* : 摩擦速度, R : 径深, k_s : 相当粗度, E : 係数, κ : Kármán 定数で清水の場合、 $\kappa = 0.4$ である。摩擦抵抗係数 f' を Darcy-Weisbach の式を用いて表現すると、 $f' = 8U_*^2/U^2$ — (2) となる。式 (2) を (1) に代入して、一般式に書きなおすと、 $1/\sqrt{f'} = c' \log(a'R/k_s)$ — (3) となる。ここに $a' = \text{antilog}(E\kappa/2.30)$ で、水路の幾何形状に従属する。矩形水路の場合 a' は B/h の関数で表わされる²⁾。ここに B : 水路幅, $c' = 2.30/\kappa\sqrt{8}$ で、清水の場合には $c' \div 2.03$ である。一方、二次元定常等流の場合の二相流現象を支配する無次元変数は次元解析により次に示す4つに集約される: $X = U_*d/v$, $Y = \rho U_*^2/r_s d$, $Z = R/d$ 及び $W = \rho_s/\rho$ 。ここに d : 粒径; v : 動粘性係数; ρ, ρ_s : それぞれ水と河床材料の密度; r_s : 河床材料の水中比重。一般には河床波の波長及び波高, 粒子の跳躍長, 河床波の伝播速度, 平均流速及び流砂量らはこの4つの変数の関数で表わされることが知られている。今、砂粒子による表面抵抗, 河床形態別による形状抵抗及び流砂に伴う抵抗らを含めた移動床の全抵抗係数 f を次式に示す固定床水路の表現式で表わされるものとする。すなわち $1/\sqrt{f} = c \log(aR/k_s)$ — (4)。そこで係数 c 及び

aは固定床水路のc', a'と同じと仮定し、さらにW≒一定として、 $k_s/d = \phi(X,Y,Z) = X^\alpha Y^\beta Z^\gamma$ とすると、式(4)は $1/\sqrt{f} = c'[(\log a'R/d) + \log(X^\alpha Y^\beta Z^\gamma)]$ —(5) となる。同式中に示す α, β, γ は前述の河床形態に従属する指数である。混合砂れきの場合には混合特性を表わす因子、例えば標準偏差、ふるい分け係数等を変数XまたはYの項に積の形で表わせば良いであろう。

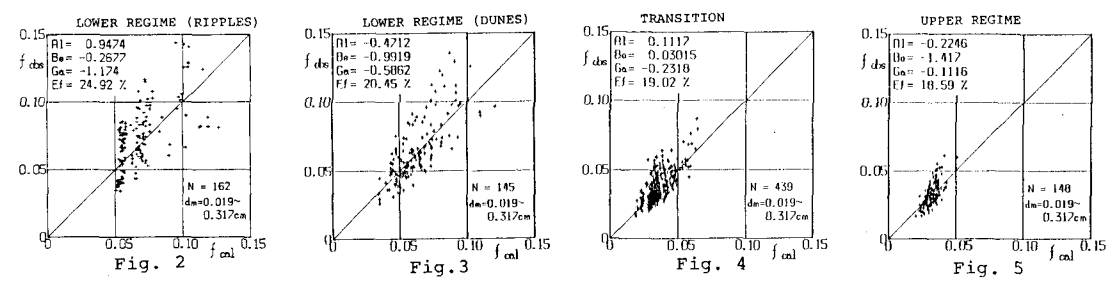
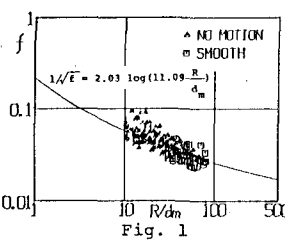
3. 各種の係数、指数の検討 統計解析に用いた実験水路の資料は、表-1に示す実験資料におけるU.S.W.E.S., U.S.G.S., 及びGilbert³⁾のものである。河床形態は前述の芦田らの分類に基づいた。粒径は平均径d_mを用いた。なお、式(5)中の全抵抗係数fはすべて径深に対応するものである。係数a'はKeulegan²⁾の理論値を用いて定式化した次式により算定した。

$1/\sqrt{a'} = 0.269 + 0.0167 \log(B/h)$ —(6)。なおc'=2.03一定とした。これは平坦河床で流砂量のない場合の資料を用いて、式(3)の $k_s \approx d_m$ として予備解析した結果、a'≒10前後の値になっていたことに基づいている。

(Fig.1 参照)。Figs. 2~4は式(5)に基づいて各regimeに対する実験値を用いて統計解析した指数値を用いて算定した全抵抗係数f_{cal}と実験値f_{obs}との対比関係を示す。同図中に示すAl, Be, Gaはそれぞれ式(5)の指数 α, β, γ の値で、Efはf_{cal}のf_{obs}に対する自乗平均誤差率 $Ef = \sqrt{\frac{1}{N} \sum [(f_{obs} - f_{cal})/f_{obs}]^2} \times 100$ である。誤差率は20%程度であり、式(5)による表現は小規模河床形態に対してはほぼ妥当であることが推察されよう。Ripplesにあっては変数X, Z、Upper Regimeにあっては変数Y、そしてDunes及びTransitionにあってはZが形状抵抗に対して支配的であることが判る。

Table-1

	U.S.W.E.S.	Gilbert	U.S.G.S.
d _m (cm)	0.0205 ~0.0586	0.0305 ~0.317	0.019 ~0.093
R/d _m	5.22 ~649.32	6.49 ~241.87	99.91 ~1347.1
h/h	3.53 ~268.76	1.84 ~42.10	0.63 ~44.58
r _e	0.007 ~0.0045	0.00012 ~0.0404	0.00007 ~0.0190



以上により、移動床水路の抵抗則は固定床のものを修正することによって表現されることが判った。今後推定精度の向上を計るためには、なお多くの資料を収集解析する必要がある。なお、本文の作成に当り、大阪産業大学水理研究室学生(当時)、樹田克仁、下中幸男諸君に協力を頂いたことを記して謝意を表します。

参考文献

1) 芦田・道上：土木学会論文報告集 No.206,1972
2) Keulegan :Laws of turbulent flow in open channels, R.P. 1151, U.S.N.B.S., Vol 21, 1938
3) 建設省 :土木研究所資料 No.1154, 1976