

移動床流れにおける粗度

土木学会水理委員会
移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会

粗度部会主査

岸 力

1 概 説

1.1. 問題の範囲

移動床の流れは、流れと流路境界の間の相互作用が流路の幾何学的な形状を創り、流れに対する流路の抵抗を規定するという特色をもっている。しかも流路の幾何学的特性には、水理効果の異なる2種類のものが考えられる：一つは直線流路、蛇行流路、網状流路など流路の平面的な形状で、この小委員会では中規模河床形態と名付けた。これは確かに流路抵抗を考える上で重要な要素である。しかし現在の知識の段階は、各種の流路形態の発生機構および統計的な特性の解明にいとぐちがつけられた処で、流体抵抗に及ぼす諸効果を定量的に評価する事は困難である。他の一つは、この小委員会が小規模河床形態と呼ぶことにした水路床の起伏で、砂漣、砂堆、遷移、平坦および反砂堆の各河床に区分される。

この報告で扱っているのは、この小規模河床河 (sand wave) と河床抵抗との関係および河床波を伴う流れの水理特性についての考察である。

1.2. 流れの多価性

移動床流れにおける流体抵抗は、同一の流路であっても河床形態によって非常に大巾に変化するので、ある水深-勾配の組合わせの下で幾種類もの流量があらわれる。この事実を最初に実験的に証明したのが Vanoni & Brooks (1957) である。図-1 に彼等の実験結果を引用する。この実験は、平均粒径 0.152mm の砂を敷いた水路に、種々の流量を与え、平均水深 0.241 ft を与える勾配を求めている。図によれば、水深と勾配が与えられても流速は一義的にはきまらないで、3つの値が生じることがわかる。また Kennedy (1971) は、図-1 の実験について、水深-勾配を指定しても流れの状態はきまらないが、水深-流速を指定すれば流れの状態は唯一にきまり、対応する勾配は一つの値にかぎられる事を注意している。われわれは、研究の最終的な目標を、「沖積地河川における水位-流量の予測」に置いた。この点では、Vanoni & Brooks の実験は基本的な問題点を明示したものであるし、Kennedy の指摘は目標への接近方法について重要な示唆を与えたものとして評価できる。

1.3. 流体抵抗に及ぼす水温の効果

この研究小委員会ではふれなかったが、流体抵抗に及ぼす水温の効果が、今後研究されるべき一つの課題であろう。アメリカ土木学会の報告 (1971) によれば、土砂を含んだ流れの抵抗に及ぼす水温の効果には少なくとも二つの性質がみられる。効果の一つは、流砂濃度によるカルマン定数の変化を通じてあらわれる。水温の低下は流砂の沈降速度を減少させるから、同一の流量では、浮遊砂濃度を増す傾向をもつ。浮遊砂濃度の増加はカルマン定数を減少させ、したがって流体抵抗を減少させる効果をもつ。他の効果は、水温変化が河床形状に及ぼす効果である。図-2 は Missouri

河における観測結果を示すものである。図-2を見ると、水温低下にしたがって、河川流量はほぼ一定に保もたれているに拘わらず、平均流速が増し、マンニングの粗度係数 n が減少している。図-2には、同時に測定された河床形態が示されているが、粗度係数 n が減少するにつれ、全長7マイルの測定区間のうち平坦河床を示す部分の割合が増し、砂堆河床においても平均波高が減じ、平均波長が長くなっている。図-2によれば、 n の減少が河床形状の変化によって生じた事が明らかである。一方、水温の低下がまざつ係数を増加させるという Franco (1968) の水路実験の結果が同じ報告に述べられている。報告に示めされた流砂委員会 (Committee on Sedimentation) の見解では、此の相反的な現象は河床形態の相違によるであろうと説明され、Missouri 河の観測が砂堆河床で行こなわれたに対し、Franco の実験が砂澱河床で行こなわれた事に注目している。

この小委員会は、前に述べた様に、「沖積地河川における水位-流量関係の予測」を最終的な目標として組織され、担当委員の手によって、多数の自然河川の資料が集められた。しかし、自然河川の資料には、流体抵抗に影響を及ぼす多くの要素の効果が複合して含まれているため、直ちに実用的な結論を示すことはできなかった。この報告では、主として水路で得られた資料による考察を述べ、直線水路を流れる定常流における河床抵抗の特性を論じている。

2 流体抵抗に及ぼす流砂の効果

2.1. 従来の接近方法

河床波を伴う流れにおいても流速分布の対数則で成立すると仮定し、水理的に粗な流れに対して、式(1)を適用する。

$$\varphi_0 = \frac{v}{u_*} = 8.5 - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \log e \frac{R}{k_s} \quad (1)$$

ここに、 φ_0 : 流速係数、 v : 平均流速、 u_* : まざつ速度、 κ : カルマン定数、 R : 径深、 k_s : 等価砂粗度

式(1)は5水理量 [v , u_* , κ , R および k_s] または [v , κ , k_s , R およ I] に関する一つの方程式である。カルマン定数 κ は、流砂濃度によって変化することが知られているが、 κ の変化を k_s の中に含めることにし、関係する水理量を4個と考へる。若し、式(1)の他に、これら4量を含んだ一つの実験的な関係が見出されるならば、径深、水面勾配および河床砂の特性 (粒径、比重など) を知って、平均流速を求めることが原理的に可能になる。この考えに沿って、椿・古屋 (1951) による $k_s/d - \tau_*$ の関係 (ただし、 d : 河床砂の平均粒径、 $\tau_* = u_*^2 / sgd = RI / sd$, $s = (p_s - p_o) / p_o$, p_s : 河床砂の密度、 p_o : 流体密度)、芦田 (1959) による $\varphi_0 - \tau_*$ の関係を始め多くの実験式が提案され、詳細な解説と紹介が杉尾 (1971) によって行こなわれている。しかし多くの提案にも拘わらず、この接近方法では広い適用性を持つ実験式は得られていない。

2.2. 吉川・福岡の研究

吉川・福岡 (1971) は流体抵抗に及ぼす流砂の効果を考慮して、さらに掘り下げた考察を行なった。流砂濃度によるカルマン定数 κ の変化は志村 (1957) によれば式(2)で与えられる。

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{1}{\kappa_0} + \frac{4.8 \bar{c} w_0 \operatorname{sg}(h-a)}{u_*^3 \left(\log_e \frac{h}{a} - 1 \right)} \quad (2)$$

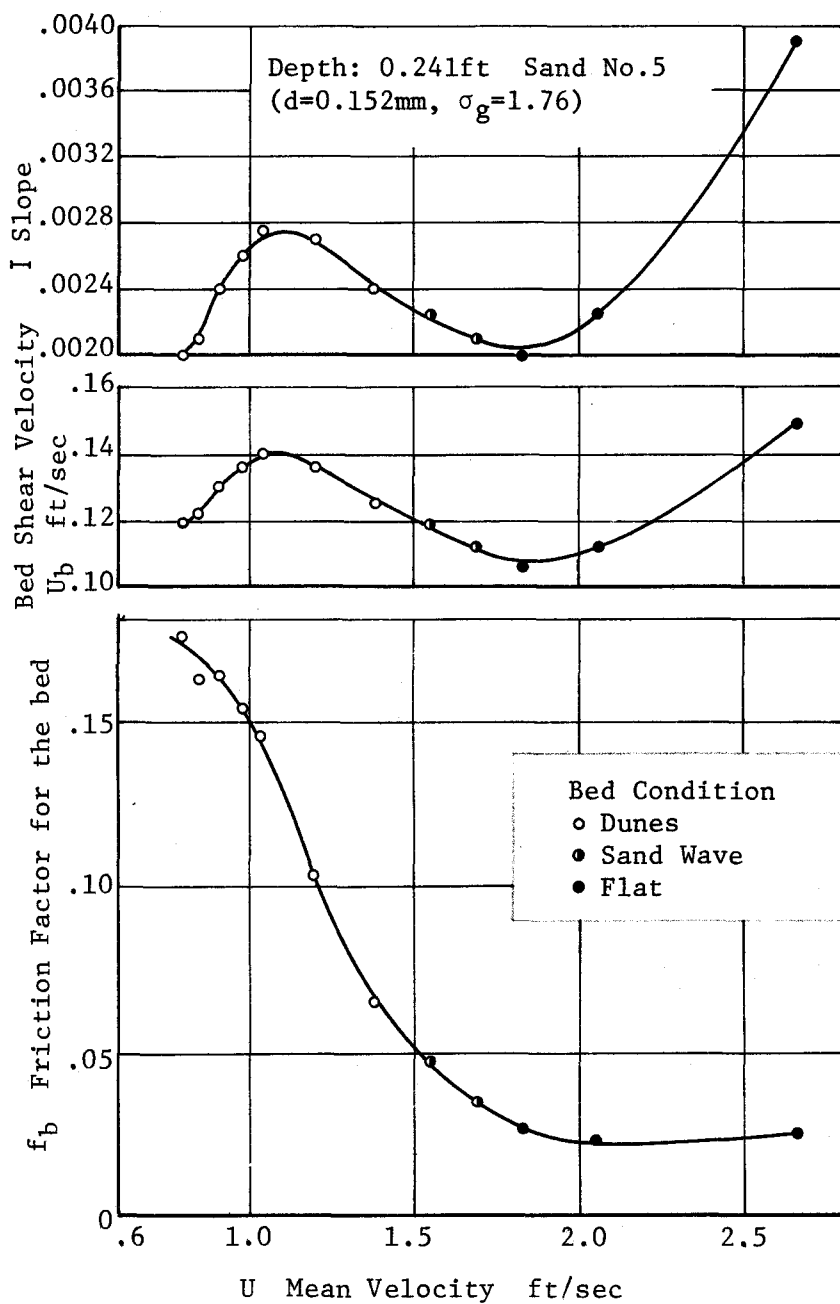


Fig. 1 Flume experiments reported by Vanoni and Brooks

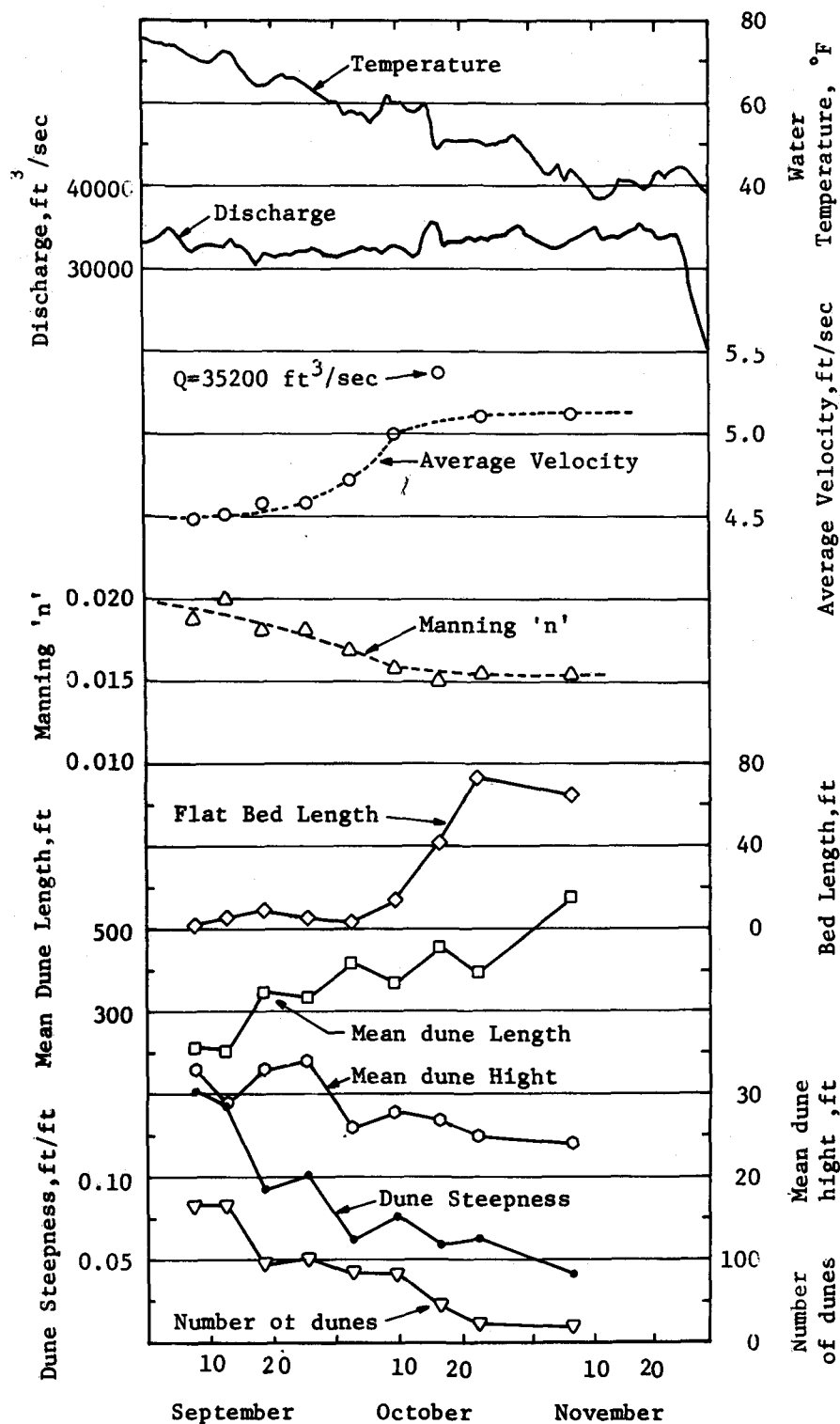


Fig. 2 Observed data for Missouri River at Omaha
(from report of sedimentation committee, ASCE, Dec. 1971)

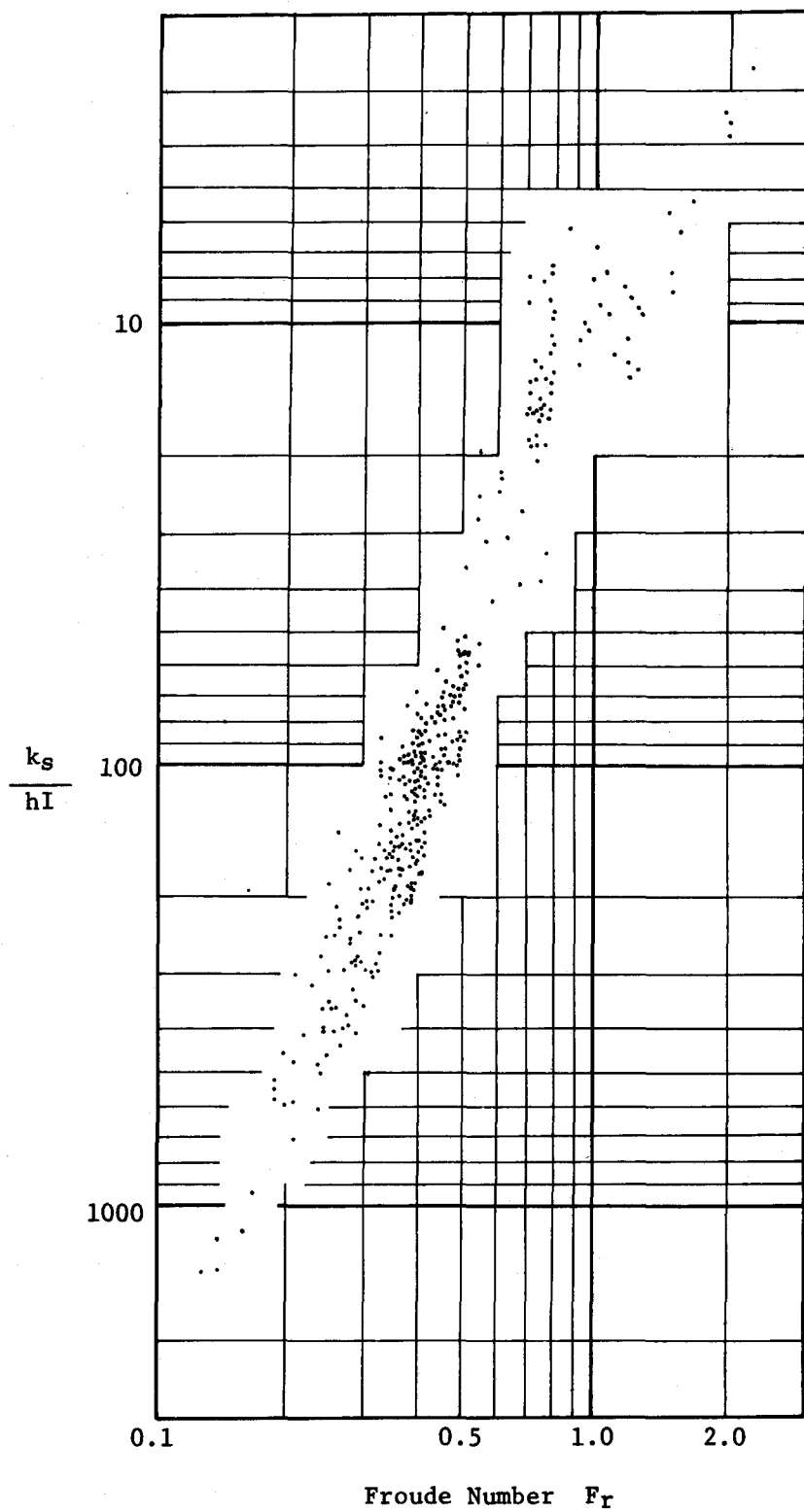


Fig. 3 Plot of k_s/hI against Fr

ここに κ_0 : 清水流の場合の κ ($=0.4$), h : 水深, $\bar{c}$: 流砂の断面平均濃度 (容積比), w_0 : 流砂の沈降速度, a : 粘性底層の厚さ ($=1.16\nu/u_*$)

式(2)によれば、流砂を伴う流れにおける κ は u_* , h の他に $\bar{c}$, w_0 および a にも依存している。ここで移動床流れにおける抵抗に関連する諸関係式をまとめると次のものがある。

$$(1) \frac{v}{u_*} = 8.5 - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \log e \frac{R}{K_s}$$

$$(2) R = f(h), \text{ 水深-径深の関係}$$

$$(3) u_* = \sqrt{gRI}$$

$$(4) q = hv, \quad q: \text{単位巾当り流量}$$

$$(5) \frac{1}{\kappa} = \frac{1}{\kappa_0} + \frac{4.8 \bar{c} w_0 \operatorname{sg}(h-a)}{u_*^3 \left(\log e \frac{h}{a} - 1 \right)}$$

$$(6) a = 1.16\nu/u_*$$

$$(7) w_0 = \left(\frac{1}{18} \operatorname{sg} \right)^{2/3} \nu^{-1/3} d \quad \dots \text{Allen の式, 微細な砂には} \\ \dots \text{Stokes の式を用いる}$$

吉川・福岡はさらに $K_s/hI - Fr$ の関係をしらべ図-3を得た。また、図において $0.7 < Fr < 1.3$ の範囲を除くと、実験値の平均値は次式で近似できるとした。

$$(8) K_s/R I = 18 Fr^{-2.25}$$

$$(9) Fr = v/\sqrt{gR} \quad (3)$$

ここにあげた(1)~(9)の関係式に含まれる諸量は13個すなわち、 v , u_* , κ , R , h , K_s , I , q , $\bar{c}$, w_0 , a , d および Fr である。

したがって4量を与えれば他は上述の9関係式から決定できる。例えば、 q , h , I および d が与えられると、流砂の平均濃度 $\bar{c}$ が計算でき、したがって流砂量が求められる。吉川・福岡は図-3に用いられた実験資料について、 $\bar{c}$ を計算した。すなわち、関係式(8)から K_s を定め、その値を用いて $\bar{c}$ を求めた。浮遊、掃流をあわせた全流砂量 q_b (容積流砂量) と τ_* の関係を図-4に示した。図において○印で示された値は、多くの計算値の平均値をあらわしている。

前述の議論にしたがえば、移動床流れの一つの状態をきめるためには、4量を与えることが必要であり十分な条件である。任意に4個以上の量を指定することも、また3個以下の量によって流れの状態を予測することも不合理である。これ迄に発表された多くの研究は、関係式(8)または図-3に相当する一つの実験式を用いることによって、3量例えば h , I および d から流れの状態を予測しようとするものであった。これらの試みが成功しなかった理由は明らかである。若し3量を与えて流れを予測しようとするれば、もう一つの関係式が必要である。図-4に示された $q_b - \tau_*$ の関係はその一つである。

吉川・福岡の研究は、流体抵抗に及ぼす流砂の効果を明らかにした点で高く評価できる。特に移動床流れにおける水深-流速関係の予測において、条件として与えるべき水理量の数を明らかにした事は重要な指摘であった。

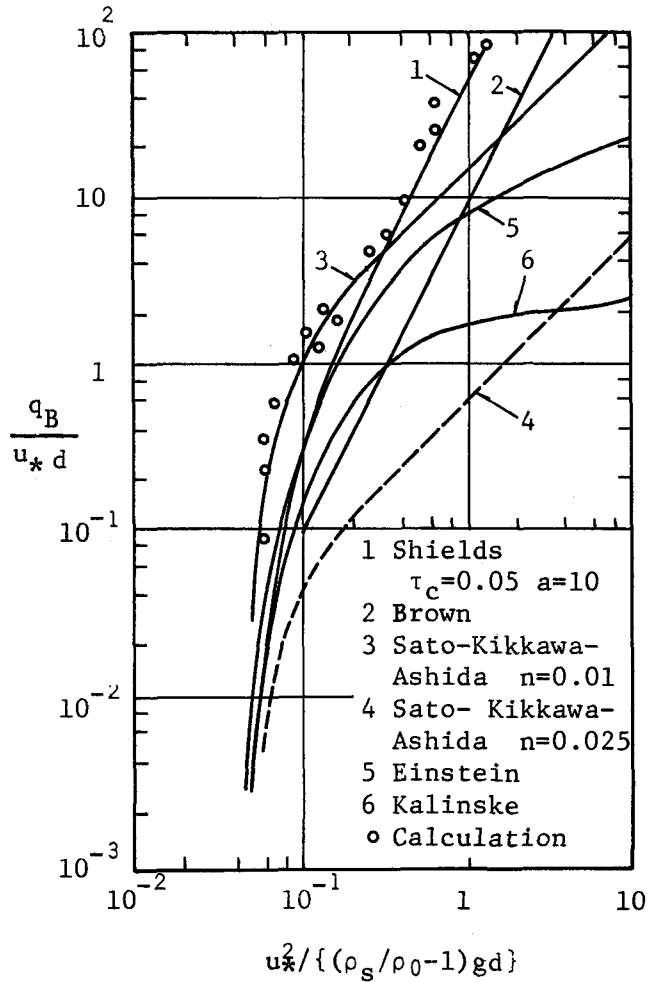


Fig. 4 Comparison of Different Sediment Discharge Formula

しかし次の2点について、さらに検討が必要であろう：

第1は、予測値の唯一性に関することである。水深、勾配および河床砂の特性を知って流速を予測する場合を考へる。吉川・福岡の方法によれば、この条件で流速が一義的に確立される。すなわち、 τ_* が与えられるから図-4により q_B ，したがって $\bar{c}$ が求められ、式(2)により κ が計算できる。すると式(1)に含まれる未知量は v と K_s の2個になり、関係式(1)と(8)を連立に解くことにより解が確定する。しかも(1)、(8)両式において v は K_s の単調減小関数であるから、 v に多価性はあらわれない。これに対し、図-1に示した Vanoni & Brooks の実験では、 $h-I-d$ のある組合わせの下では流速 v は多価性を示す。流速の多価性は、図-3においても、 $0.7 < Fr < 1.0$ の範囲の実測値に認められる。この範囲では K_s/hI の値は、 Fr 数には独立に変化する挙動を示している。

第二は、流砂量が小さく $\kappa \approx \kappa_0$ ($= 0.4$) とみなせる場合の性質である。流速の対数式を指数式で表わせば式(1)は式(4)で近似できる。

$$\varphi_0 = \frac{v}{u_*} = 7.66 \left(\frac{R}{K_s} \right)^{1/6} \dots \text{Manning - Strickler} \quad (4)$$

式(4)を変形すれば $k_s/RI = (7.66^6/\varphi_0^4) Fr^{-2}$ が得られる。これと式(3)と比較すれば、式(3)は $\varphi_0 \approx 10$ を与えることがわかる。この値は、砂堆波高 d を K_s にとれば $d/h = 1/5$ に相当し、砂堆河床の φ_0 の平均的な値をあらわしている。しかし、抵抗予測の問題では、水理量の変化による φ_0 の変化を求めようとしているから、式(3)では不十分である。この事から考えると、吉川・福岡の方法は、流砂量が多くて、流体抵抗に占める河床波の効果にくらべ、カルマン定数 κ の減少効果が無視できない場合に適するものであろう。

3 河床形態と流体抵抗の関係

移動床流れの抵抗則は河床形態によって異なる特性を示すと考えられる。例えば、この小委員会の河床形態部会の報告によれば、砂漣と砂堆の波高、波長は水理的に違った挙動を示す。砂漣の波高、波長は河床の粒径と相関をもち、水深とは相関がないのに対し、砂堆の特性は水深と相関をもつが粒径とは無相関である。また、平坦河床あるいは反砂堆河床の抵抗を考える場合には、単に幾何学的な形状ばかりでなく、流砂濃度による抵抗減少効果は無視することは不合理であろう。

他方、水深一流速関係の予測という立場で考えると、河床形態の区分を考えることにより、流速の多価性という困難を解決できそうである。

3.1 Engelund の研究

Engelund (1967) は河床形態を指定すれば粒子せん断力 τ_*' (有効せん断力) は河床せん断力 τ_* のみの関数になり、式(5)が成立すると主張している。

$$\tau_* = f(\tau_*') \quad (5)$$

ただし、 $\tau_* = RI/sd$ であり、粒子せん断力 τ_* は Einstein-Barbarossa (1952) の式に小修正を加えた式(6)、(7)で定義されている。

$$\tau_*' = RI'/sd = R'I/sd \quad (6)$$

$$v = \sqrt{gR'I(6.0 + 5.75 \log_{10}(R'/2d))} \quad (7)$$

Engelund は式(5)を導くに当って、河床抵抗の相似仮説を提唱している。

Engelund は Guy, Simons, および Richardson (1966) による水路実験の資料を用いて式(5)の関数形を定めた。図-5 はその他に Gilbert (1914) の資料、佐藤・吉川・芦田 (1959) の資料を加えて式(5)の成立をしらべた結果を示す。

図中の実線は Engelund が与えた式(5)の関係である。図において次の諸点が注目される。(1) 砂堆河床については、河床粒径および水理量の大巾な変化にも拘らず、式(5)の関係が成立すると認められる。ただし、Engelund は $\tau_*' = 0.4 \tau_*^2$ で近似される領域を砂堆河床の中に入れていたが、この報告では遷移の一形態と考えた。

(2) 平坦河床の線は $\tau_*' = \tau_*$ をあらわしているが、実験値の一部は明らかに $\tau_*' > \tau_*$ である。流砂輸送のための抵抗増加を考えると、 $\tau_*' > \tau_*$ となることは、流砂による抵抗減少効果を示していると思われる。

アメリカ土木学会の流砂委員会報告(1971)では Engelund の研究を次のように論評している：抵抗の相似仮説の正当性は証明されていないが、Rio Grande τ_* や Pigion Roost Creek の水深-流速曲線は彼の予測曲線とよく合っている。ただ彼の方法では、抵抗に及ぼす流砂および水温の効果をはっきりとは考慮していないので、これら影響が相似仮説に含まれるかどうかは明らかでない。

これらの問題点の吟味は後に譲り、一応式(5)あるいは図-5の成立を認めると、各河床形態毎に抵抗則が求められる。したがって、河床形態の領域区分を行なえば、移動床流れの水深-流速関係を知ることができる。

3.2 河床形態の領域区分

河床形態の領域区分については、河床形態部会の報告の中で説明が行なわれているが、ここでは河床抵抗との関連をしらべた岸・黒木(1972)の考察をつけ加えたい。

移動床流れの流速係数 φ_0 は一般に式(8)であらわされるであろう。

$$\varphi_0 = \frac{v}{u_*} = f_1 \left(\frac{u_* d}{\nu}, \tau_*, \frac{R}{d}, \frac{\rho_0}{\rho_s}, \kappa \right) \quad (8)$$

河床抵抗が河床形態毎に異った特性を示すとすれば、河床形態の領域区分は式(8)に含まれる無次元量の間の関係としてあらわされるであろう。考察の対象を水と砂の資料に限定し、さらに砂漣と砂堆を Lower Regime として一括すれば、河床形態の領域区分は式(9)の形をもつ。

$$f_2(\varphi_0, \tau_*, \frac{R}{d}, \kappa) = 0 \quad (9)$$

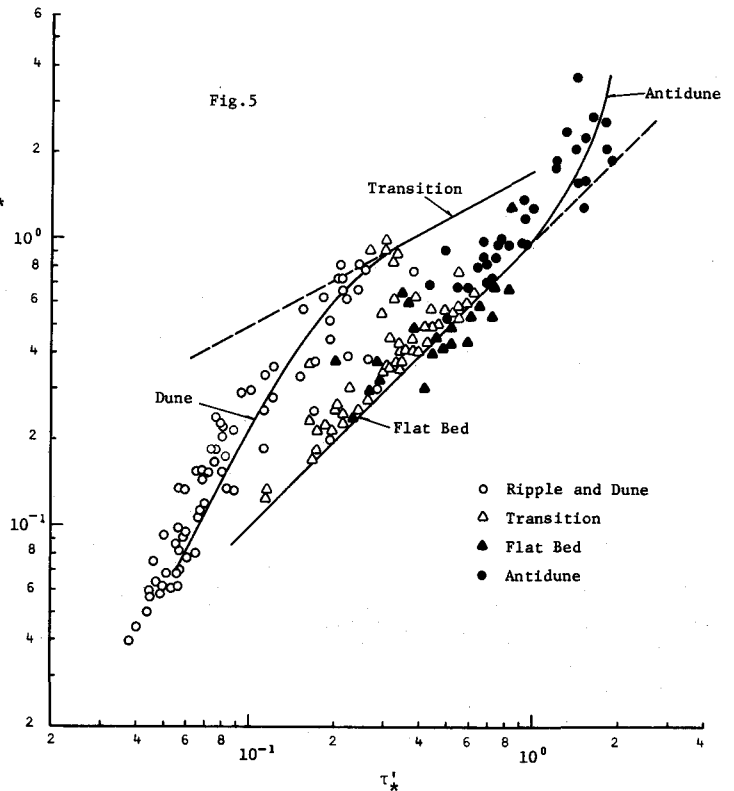
一方、 φ_0 、 τ_* 、 R/d 、 Fr 、および I の間には式(10)の関係がある。

$$\varphi_0 = Fr / \sqrt{I} \quad (10-1)$$

$$\varphi_0^2 = (1/s)(R/d)(Fr^2/\tau_*) \quad (10-2)$$

したがって式(9)と式(10-2)から R/d を消去することができる。すなわち、領域区分は式(11)に示した4種の形式のどれかであらわされる。

$$f_2(\varphi_0, \tau_*, R/d, \tau_*) = 0 \quad (11-1)$$



$$f_3 (\varphi_0, I/s, R/d, \kappa) = 0 \quad (11-2)$$

$$f_4 (\varphi_0, \tau_*, Fr, \kappa) = 0 \quad (11-3)$$

$$f_5 (\varphi_0, \tau_*, I/s, \kappa) = 0 \quad (11-4)$$

椿, 渡辺および定村 (1971) は河床の安定理論から Lower Regime の存在条件を求めているが, 領域区分線の関数形は式 (11-3)' で与えられた。

$$f_6 (\varphi_0, \tau_*, Fr) = 0 \quad (11-3)'$$

また, 水路実験の資料と比較して, Lower Regime の領域区分は式 (11-3)' で

$$\varphi_0 = 8 \quad (12)$$

と置いた曲線で近似できる事を見出している。式 (12) に関して, よく発達した砂堆河床では, 河床砂の粒径や水理条件に無関係に, $\varphi_0 \approx 10$ という経験的な事実があり, その理由が, 河床形態部会の報告に述べられている。

若し Lower Regime と遷移河床との領域区分線上で, $\varphi_0 = \text{const.}$ が成立するとすれば, 式 (11) から φ_0 を除くことができる。また κ は流砂量が大でなければ $\kappa \approx \kappa_0 (= 0.4)$ であるから, 式 (11) は式 (13) になる。

$$f_7 (\tau_*, R/d) = 0 \quad (13-1)$$

$$f_8 (I/s, R/d) = 0 \quad (13-2)$$

$$f_9 (\tau_*, Fr) = 0 \quad (13-3)$$

$$f_9 (\tau_*, I/s) = 0 \quad (13-4)$$

式 (13-1~4) は河床形態部会の報告に紹介されていて, それぞれ芦田一道上, Garde-Raju, 椿-斉藤, Garde-Albertson, および杉尾の区分図である。岸・黒木 (1972) は砂澁・砂堆河床と遷移河床との境界を式 (14) で与えている。

$$I/s = 0.02 (R/d)^{-1/2} \quad (14-1)$$

$$\tau_* = 0.02 (R/d)^{1/2} \quad (14-2)$$

反砂堆河床の発生は Fr 数によって規定される。椿・斉藤 (1967), 椿・渡辺・定村 (1971) によれば, 反砂堆の存在条件は $Fr \geq 1$ であり, また林 (1970) および白砂 (1971) によれば平坦河床は $Fr > 1$ では存在しない。これらの理論を参照すれば, 反砂堆河床の領域区分は $Fr = 1$ で近似できるであろう。図-6 は $Fr - \tau_*$ 関係によって領域区分をしらべたものである。 $\tau_* \geq 1$ の場合は, 反砂堆河床の存在領域は $Fr \geq 1$ で与えられる。しかし $\tau_* < 1$ では, 反砂堆河床があらわれる Fr 数は τ_* によって変化している。岸・黒木は反砂堆河床の領域区分として式 (15) を与えた。

$$\tau_* \geq 1, Fr = 1.0 \quad (15-1)$$

$$\tau_* < 1, \tau_* \cdot Fr^2 = 1.0 \quad (15-2)$$

一方, 河床形態部会の報告 (図-3) には Garde-Raju の実験曲線が引用されている。岸・黒木 (1972) は反砂堆河床と平坦・遷移河床との境界を式 (16) で与えた。

$$I/s = 0.06 (R/d)^{-1/2} \quad (16-1)$$

$$\tau_* = 0.06 (R/d)^{1/2} \quad (16-2)$$

また $Fr = \sqrt{I} \varphi_0$ であるから、式(15)に式(16)を代入すると、それぞれ

$$\begin{aligned} \tau_* > 1 \text{ or } (R/d) \geq 280, \\ \varphi_0 = (0.06 \cdot s)^{-1/2} (R/d)^{1/4} = 3.18 (R/d)^{1/4} \end{aligned} \quad (17-1)$$

$$\begin{aligned} \tau_* < 1 \text{ or } (R/d) < 280, \\ \varphi_0 = 1/0.06 \cdot \sqrt{s} = 1.29 \end{aligned} \quad (17-2)$$

とが得られる。

しかし、反砂堆河床に対する関係式(15)～(17)は、後述の抵抗解析の結果を考え合わせると、なお検討の余地がある。

3.3 全せん断力 τ_* と粒子せん断力(有効せん断力) τ_*' との関係

先づ τ_* と τ_*' の関係が抵抗則を与える事を示しておく。

式(7)を指数式で近似すれば式(18)になる。

$$\frac{v}{u_*} = \varphi_0 = 7.66 \left(\frac{R}{2d} \right)^{1/6} \left(\frac{\tau_*'}{\tau_*} \right)^{2/3} \quad (18)$$

式(18)の右辺における $(\tau_*'/\tau_*)^{2/3}$ は河床波による抵抗の増加をあらわしている。

3.3.1 砂堆河床

図-5において τ_* と τ_*' の関係を定式化すると式(19)が得られる。

$$\tau_*' = 0.21 \tau_*^{1/2} \quad (19)$$

岸・黒木(1972)は抵抗の相似仮説によらないで現象論的に式(19)を導いている。すなわち、

3.2で述べたように式(14)で与えられる領域区分線上で φ_0 は (R/d) および τ_* に無関係に $\varphi_0 = 8 \sim 10$ の一定値をとる。この事から、 $\tau_*' \propto \tau_*^{1/2}$ が得られる。また式(19)と $\tau_*' = \tau_*$ との交点は平坦河床上における河床砂の移動限界 τ_{*c} を与える。

実際、式(19)によればそれぞれ次の値が得られる。

$$\text{砂堆区分線上で} \quad \varphi_0 = 8.9 \quad (20-1)$$

$$\text{移動限界} \quad \tau_{*c} = 0.044 \quad (20-2)$$

式(20)の結果は、式(19)の妥当性を支持している。

3.3.3 平坦河床および反砂堆河床

平坦河床、反砂堆河床では砂堆河床にくらべ流砂量が多いから、流砂による κ の変化(抵抗減少効果)を考える必要がある。抵抗の基本式(18)は式(7)から導かれたが、式(7)では $\kappa = \kappa_0 (=0.4)$ としている。 κ の変化を考慮すれば式(7)に代り、近似式(20)を用いるべきである。

$$v/v_*' = 7.66 (\kappa_0/\kappa)^{1/2} (R'/2d)^{1/6} \quad (21)$$

したがって、 $\kappa \neq \kappa_0$ のときの平坦河床は

$$\tau_*' = (\kappa_0/\kappa)^{3/4} \tau_* \quad (22)$$

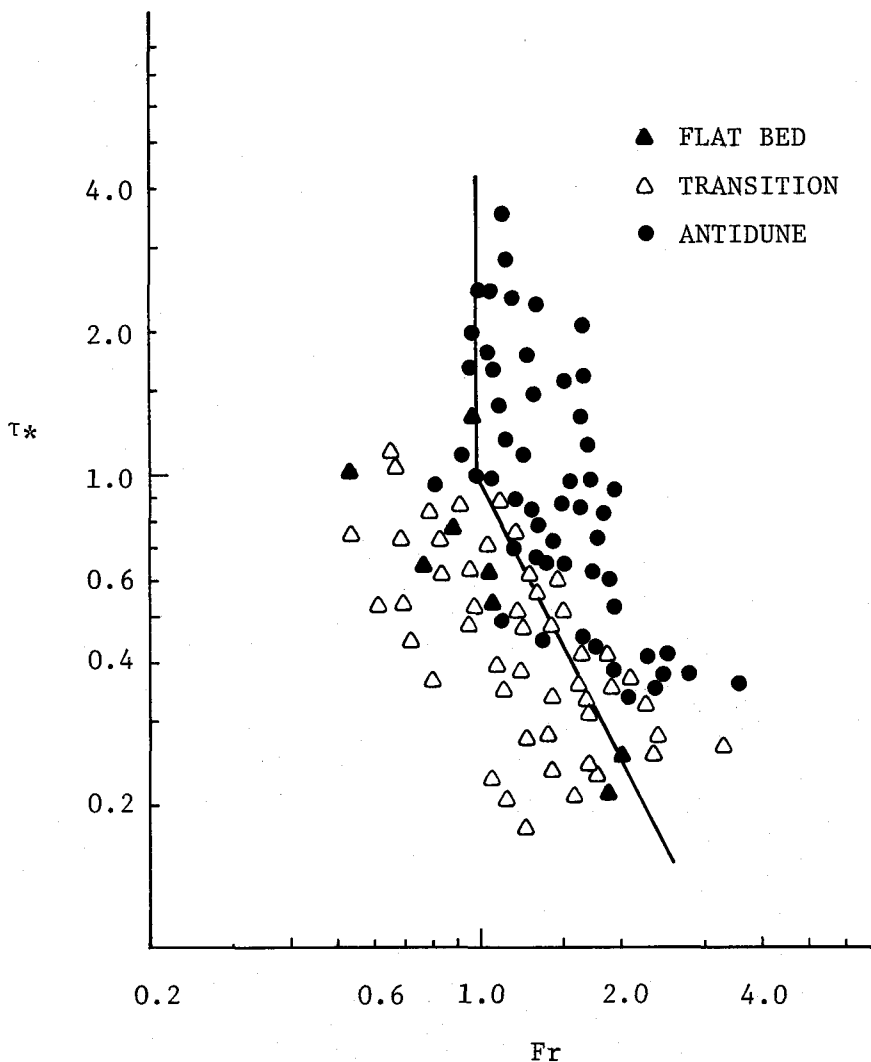


Fig.6

で与えられることになる。図-5において、平坦河床に対して $\tau_*' = 1.4 \tau_*$ の関係が示されているが、これは $k = 0.25$ に相当している。

反砂堆河床に対しても、図-5から式(5)の関数形を考えることができる。しかし、反砂堆河床の領域区分に関し実験的に見出された諸性質を矛盾なく説明できる関数形は得られていない。

3.4 河床形態と抵抗則

砂堆河床の流速係数 φ_0 は、式(18)に式(19)を代入すれば、式(23)によって与えられる。

$$\varphi_0 = \sqrt{\frac{8}{f}} = 2.7 \left(\frac{R}{2d} \right)^{1/6} \tau_*^{-1/3} \quad (23)$$

砂堆河床と遷移河床の区分は式(14)で与えられている。

平坦河床での φ_0 は、式(22)を参照すれば式(24)で与えられる。

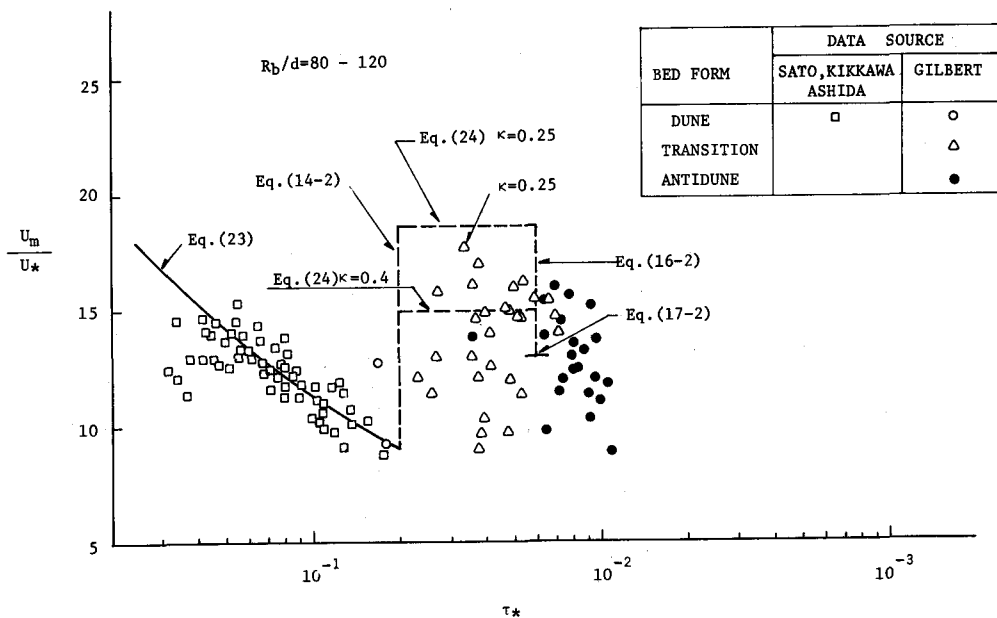


Fig. 7-a

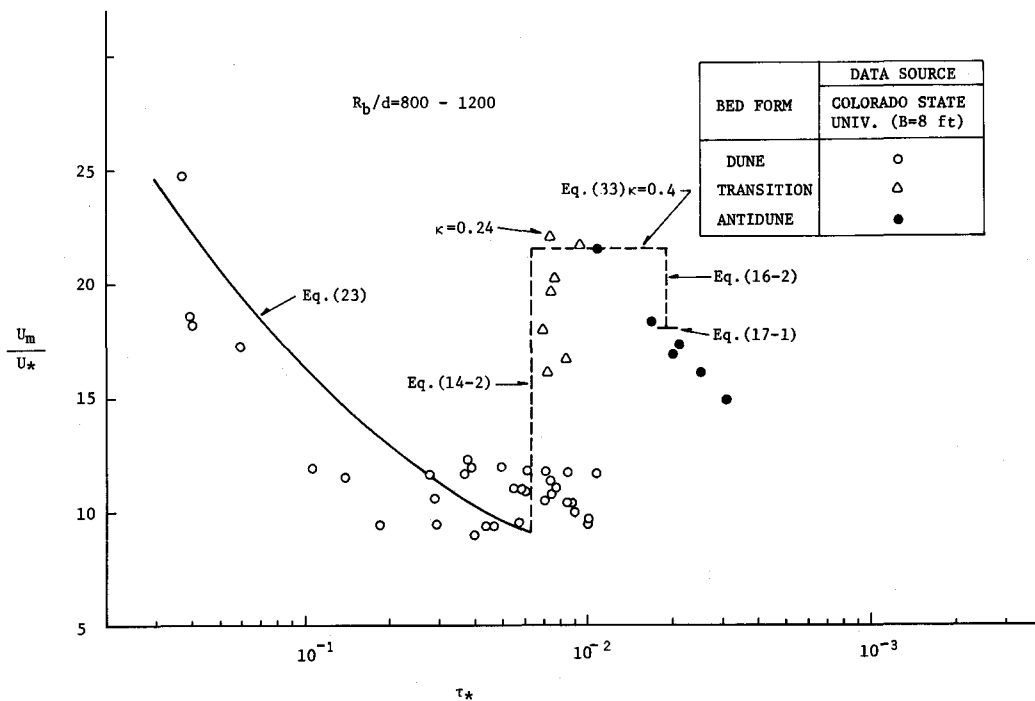


Fig. 7-b

$$\varphi_0 = \sqrt{\frac{8}{f}} = 7.66 (\kappa_0 / \kappa)^{1/2} (R / 2d)^{1/6} \quad (24)$$

反砂堆河床の発生条件は式(16)で与えられている。

φ_0 の理論値と実験値とを比較し図-7に示した。図-7(a)は $R/d \cong 100$, 図-7(b)は $R/d \cong 1,000$ の例である。図には上述の種々の理論値が記入されているが、砂堆河床の抵抗則および領域区分は実験値によく適合していることがわかる。遷移および平坦河床の領域に対しては、 φ_0 の確定値を予測することはできない。流体抵抗に及ぼす κ の効果をしらべるため、図7(a)および(b)でそれぞれ○印を附した測点について、式(2)によって κ を求めた。両測点の κ はそれぞれ 0.25 および 0.24 ではほぼ同じ値であった。図7(a)の場合には式(24)による φ_0 の値が実験値に適合したに対し、図7(b)の場合には式(24)による φ_0 の値は過大で、結果的には $\kappa = \kappa_0$ とした値に近かった。この性質は図-5にもあらわれていて、 $\tau_*' > \tau_*$ となる実験値は $\tau_* = 0.3 \sim 0.7$ の範囲にだけ見られる。この事は R/d が小さい場合に限って $\tau_*' > \tau_*$ となるとも解釈できる。実験にあらわれた一つの特色として、留意に値する性質である。

4 むすび

粗度部会では「沖積地河川における水位-流量」関係の予測を目標として一年間研究を行った。この報告は、研究成果の一部を紹介したもので、移動床流れにおける流体抵抗の基本的な性質を水路実験の資料によって考察した結果を述べている。

まず、移動床流れで水深-流速関係を予るに必要な水理量の数を考察した。従来は3水理量例えば、 h , I および d と一つの実験関係によって抵抗を予測する接近方法がとられていた。しかし流砂が抵抗に及ぼす効果を考慮すると、従来の接近方法では条件が一つ不足で予測できないことがわかった。また h , I , および d を与える場合には、水理量の組合せによって、ある範囲では抵抗に多価性があらわれる事も注意された。

粗度部会では、追加すべき第二の条件として、河床形態の領域区分を用いる接近方法を試みた。この事により、砂堆河床の流れの特性はほぼ解明できた。これに対し、砂堆上の流れの特性解析は未完成で、単に領域区分を示したに止った。また流砂が抵抗に及ぼす効果の評価方法についても問題が残った。この様に、未解決の点がいくつか含まれているが、粗度部会のとった近近方法の将来性は有望であると思われる。

しかし、粗度部会が目標とした自然河川に対する抵抗予測にはさらに多くの問題解明を必要とする。例えば、流路の平面形状、断面形状の抵抗に及ぼす効果；交互砂州、横断砂州など砂州河床上の流れと本報告で扱った小規模河床波上の流れとの相違；流れに対する河床形状の追従性などを直ちに指適することができる。その他、本報告でも紹介したが、水温の効果にも留意しなければならない。この報告でとり上げた基礎的な問題に続いて、さらに多面的な研究の積み重ねが望まれる。

参 考 文 献

1. Committee on Sedimentation, ASCE (1971): Sediment Transportation Mechanics: Fundamentals of Sediment Transportation, Task Committee on Preparation of Sediment Manual, Journal of Hydraulics Division, ASCE, Dec..
2. Cooper, R. H. and Peterson, A.W.: A Riview of Data Form Sediment Transport Experiments, Rep. No. HY-1969-ST2, Hydraulics Laboratory, Dept. of Civil Eng., Univ. of Alberta, Canada.
3. Einstein, H.A. and Barbarossa, N.L. (1952): 文献 8 参照
4. Englund, F. (1967): closure to "Hydraulic Resistance of Alluvial streams," Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 93, No. HY-4, July.
5. Gilbert, G.K. (1914): 文献 2 参照
6. Guy, H.P., Simons, D.B., and Richardson, E.V. (1966): 文献 2 参照
7. Hayashi, T. (1970): Formation of Dunes and Antidunes in Open Channels, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, HY-2, February.
8. Kennedy, J.F. (1971): Sediment Transportation Mechanics: F, Hydraulic Relations for Alluvial Streams, Task Committee for Preparation of the Sedimentation Manual, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, January.
9. 吉川秀夫, 福岡捷二 (1 9 7 1) : Characteristics of Open-Channel Flow with Sediment, 東京工大土木工学科研究報告, № 10, 6月
10. 岸 力, 黒木幹男 (1 9 7 2) : 移動床流れにおける 河床形状と流体抵抗, 北大工学部研究報告 (投稿中)
11. 佐藤清一, 吉川秀夫, 芦田和男 (1 9 5 7) : 河床砂礫の掃流運搬に関する研究, 建設省土木研究所報告, 第 98号, 12月.
12. 白砂孝夫 (1 9 7 1) : 各種 Sand Wave の発生領域に関する研究, 電力中央研究所, 技術第二研究所報告, № 7 0 0 1 3, 4月.
13. 杉尾捨三郎 (1 9 7 1) : 移動床の抵抗法則, 水工学シリーズ 7 1 - A - 5, 土木学会水理委員会, 7月.
14. 椿東一郎, 齊藤隆 (1 9 6 6) : 流れによる Sand Wave の発生限界, 九大工学集報.
15. 椿東一郎, 渡辺訓甫, 定村寛文 (1 9 7 1) : 砂礫堆の形成について, 土木学会年次講演会.