

# 移動床流れの水位と流砂量の予測に関する基礎的研究

## FUNDAMENTAL STUDY ON PREDICTION OF DEPTH AND SEDIMENT RATE IN AN ALLUVIAL CHANNEL

吉川秀夫\*・石川忠晴\*\*

By Hideo KIKKAWA and Tadaharu ISHIKAWA

### 1. はじめに

河川は水の流路であると同時に土砂の流路でもあり、河床は上流から流送される砂礫で構成されている。砂礫の移動により河床が変形すると諸水理量間の関係も変わり、たとえば洪水疎通能力にも影響する。したがって河道計画にあたっては、流水と流送土砂の相互作用として生じる諸現象を解明しておく必要がある。本研究は、その基礎的段階として、砂堆河床の直線水路を対象に定常等流状態の水理量および流砂量の予測法を検討するものである。

移動床流れの系のとらえ方には種々の考え方があると思われるが、ここでは 図-1 に示すように流砂量、水理量、砂堆形状を要素とする系として考えることにする。したがって移動床流れを同定するには ①～⑥ の相互依存関

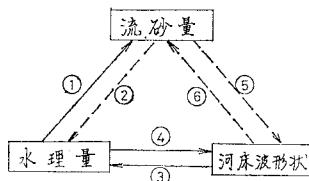


図-1 本研究での移動床流れのとらえ方

は水流の砂礫輸送能力に関する関係である。②は砂礫の混入による水流の性質の変化を表わす。たとえば、乱れの特性の変化、平均流速分布の変化、それらによる抵抗係数の変化等である。③は砂堆が形成されることによる抵抗係数の変化を示す。一方、砂堆の大きさは水理条件によって著しく異なる。この関係を ④ で表わす。⑤は流砂量が砂堆の成長に及ぼす効果を表わす。⑥は砂堆形状が流砂量に及ぼす影響を表わす。すなわち、砂堆が形成されると水流が河床に及ぼす応力のうち砂礫を移動させるに働く有効な応力の割合が減少する。この減

少量と砂堆形状の関係である。

さて、問題を完全に解決するには ①～⑥ の関係をすべて明らかにしなければならない。しかし 6 個の関係が等しく重要だというわけではなく、それぞれが結果に及ぼす影響の度合にはおのずと軽重がある。流砂量の予測という見地からすれば、まず ① の関係を明らかにすることが重要であろう。次に ① の関係の input となる水理量を規定する関係、②と③について考える。砂粒子の混入による抵抗係数の変化は主に upper regime において顕著になると思われるが、ここで対象としている砂堆河床の場合には、③に比較して二次的であるといえよう。そこで次には ③ の関係を扱う。次に ③ の関係式の input となる砂堆形状を規定する関係、④と⑤について考える。定常状態において流砂量が主に水理量に依存するとすれば、結局砂堆形状は水理量のみの関数として近似的に表わされるはずである。つまり ⑤ の関係を ④ の関係に含めて取り扱えるものと思われる。そこで次に ④ の関係が採り上げられる。

以上の 3 個の関係をこの系の主線関係(図-1 の実線)、残りの 3 個の関係を傍線関係と呼ぶことにする。系の構成要素は 3 個であるから、主線関係を明らかにできれば一応は移動床流れを同定することができる。傍線関係は主線関係を表わす式の補正という形で考慮される。もちろんこのような取り扱いは、先に選んだ主線関係の結果に及ぼす影響が残りの傍線関係のそれに比べて十分大きい条件下においてのみ成立する。

③、④ の関係はいわゆる抵抗則であり、① は流砂量式である。本研究の主な特長は、砂堆の形状特性を介して抵抗則を定式化する点にある。従来の抵抗則に関する研究のほとんどは次元解析等によって得られたパラメーター間の関係を実測データを使って求めようとするものである<sup>1)～4)</sup>。しかし、この方法では数式の導出がまったくデータに依存するので、結果の普遍性が常に問題とされる。実際、それらの結果は、その研究者のデータには

\* 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 建設省土木研究所

良く合うが、他の研究者のデータやその後にとられたデータによって修正されたり、否定されたりする場合が多い注<sup>1)</sup>。現象としては、砂堆が形成されることによって抵抗が変化するのであるから、砂堆形状特性を介して取り扱うのが望ましいと思われる。一方砂堆の形状についての研究はいくつかあるが<sup>2), 3)</sup>、抵抗則を表わすには至っていない。その意味で本研究の方法は新しい試みである。

著者は①、③の関係についての研究結果をすでに発表している<sup>2), 3)</sup>。本論文では、前半において④の関係を取り扱い、後半では①、③、④の主線関係の理論のみを組み合わせることにより実現象をどの程度表わし得るか、具体的な計算例をもって示すことにする。

## 2. 平衡状態の砂堆の波高

### (1) Gill の式

Gill<sup>6)</sup>はExnerモデルを用いて砂堆の波高を表わす式を導いている。すなわち一次元的な水流の運動方程式と水と流砂の連続式およびBrown-Einstein型の流砂量式から次式が導かれる。

$$\frac{H}{d} = \frac{1}{2n\alpha} (1 - F^2) \left( 1 - \frac{\tau_c}{\tau_0} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここに、 $\alpha$ は砂堆の形状係数で砂堆を三角形とすれば $1/2$ である。また $n$ は流砂量 $q_B$ が次式で表わされた場合の指数で、

$$q_B = \alpha \left( \frac{\tau_0}{\tau_c} - 1 \right)^n \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

$n: 2 \sim 3$ と考えられる。また $H$ : 砂堆波高、 $d$ : 水深、 $F$ : フルード数、 $\tau_0$ : 底面せん断力、 $\tau_c$ : 限界掃流力である。

さて、式(1)を導くにあたっていくつかの仮説や前提がおかれていたが、最も重要なのは次の2点である。

- ① 底面せん断力と断面平均流速が次式で関係付けられるとする。

$$\tau_0 = \frac{\rho}{2} f \bar{u}^2 \quad f \approx \text{const.} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

- ② 流砂の非平衡性は無視し得るとする。

これらの成立条件について厳密な議論をすることは難しいが、定性的には次のように考えられる。①は、境界層厚の変化が急激な場合には成立しない。著者の一人は、再付着点からの境界層の発達について検討しているが<sup>7)</sup>、それによるとこのことによる $f$ の変化は、剥離点からの流下距離を $X$ とするとほぼ次の領域に限られて

注 1) たとえば、文献 1) の  $u_s''/\bar{u} - \psi_{35}$  曲線はその後の多くのデータを説明できない、また文献 3) の  $\tau_s - \tau_s'$  曲線は岸・黒木らによって修正されている。

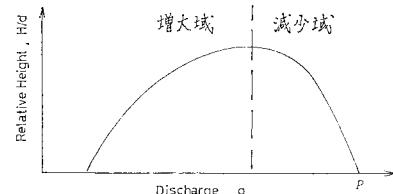


図-2 砂堆波高と流量の関係

いる。

$$X/H \leq 10$$

したがって波形勾配がかなり大きな砂堆以外は十分成立すると考えて良いように思われる。②は流砂の跳躍距離が砂堆波長に比べて十分小さい範囲でのみ成立する。以上のことから、式(1)は流砂の運動がそれほど活発でない場合の砂堆の波高を示していると思われる。

さて、河床材料・底勾配を一定として流量を変え、異なる等流状態について砂堆の波高を観察すると図-2のように変化していることがわかる。すなわち波高の増大域と減少域がある。このような傾向は開水路でも管路でも観察される。これと式(1)とを比較する。式(1)では $(1 - \tau_c/\tau_0)$ の項が増大域の変化を受けもっている。一方 $(1 - F^2)$ の項は水面変動の効果を表わしており注<sup>2)</sup>、結局、式(1)では減少域を説明できないことがわかる。この理由として次のことが考えられる。減少域では平均的な跳躍距離は砂堆の波長と同程度かまたはそれ以上になり、頂部を通過する砂粒子のかなりの部分が剥離領域を飛び越えるようになる。したがって前述の②の仮定が成立せず、減少域については別の取り扱いをする必要があるものと考えられる。

しかし非平衡性を考慮して流砂運動を取り扱った研究は少なく、またいざれも平坦河床についてのものであるので、増大域のように簡単に減少域を扱うことは、現在のところ難しい。そこで洞察に基づいたある程度大胆な取り扱いをせざるを得ない。

### (2) 減少域について

#### a) 仮説

減少域では砂堆頂部がそれ以上高まることを抑制する要素があるはずである。砂粒子が持ち去られる割合(pick up rate)が底面摩擦力によって定まるので<sup>10)</sup>、この抑制条件は局所的な底面摩擦力によって表わされるものと推測される。そこで次のような仮説を立てる。

- ① 減少域においては、砂堆頂部で無次元底面摩擦力  $\tau_*$  がある定まった値をとる。
- ② この値は平坦河床領域と砂堆河床領域の境界を表わす関係式を満足する。

注 2) 管路流について同様の計算をすると $(1 - F^2)$ の項は現われない。

この条件は図-2 の  $P$  点においては当然満足されている。これが減少域全体にわたって成立すると仮定するわけである。

### b) 限界無次元底面摩擦力

仮説2の条件を満足する無次元底面摩擦力を  $\tau_{*0}$  と書くことにする。

Garde & Raju<sup>11)</sup> は、豊富な水路実験データと実河川の測定データに基づいて領域区分図を与えている。砂堆河床領域の上限の線を彼らの区分図から読み取って式で表わすと次のようになる。

$$\frac{I}{(\rho_s/\rho-1)} = 0.0147 \left( \frac{R}{D} \right)^{-0.468} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $\rho_s$ : 砂粒子密度、 $\rho$ : 水の密度、 $I$ : 勾配、 $R$ : 径深、 $D$ : 砂粒子径。水深に比べて十分幅の大きな水路を考えて  $R$  を  $d$  で置き換え、 $\tau_{*0} = dI/(\rho_s/\rho-1) D$  の関係を用いて整理すると次式を得る。

$$\tau_{*0} = 0.0147 \left( \frac{d}{D} \right)^{0.532} \quad \dots \dots \dots (5)$$

仮説に従って、この関係が砂堆頂部で成立するとする。砂堆はほぼ三角形で近似できるので、砂堆頂部の水深は  $(d-H/2)$  となり、これを式(5)の  $d$  に置き換えて次式を得る。

$$\tau_{*0} = 0.0147 \left( \frac{d-H/2}{D} \right)^{0.532} \quad \dots \dots \dots (6)$$

### c) 加速流下の摩擦速度の近似解法

著者は文献8), 9) で底面摩擦力の算定法を示した。それによれば、境界層内速度分布として対数則を用い、次式に代入して数値積分することにより求めることができる。

$$\int_0^{\delta} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) dy = u_b \frac{du_b}{dx} \delta - u_{*0}^2 \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $u$ : 流下方向流速、 $v$ : 鉛直方向流速、 $u_b$ : 境界層外縁流速、 $\delta$ : 境界層厚である。

この式から  $u_{*0}$  を求めるには最終的に数値積分しなければならない。しかし本章ではその結果と式(6)とを連立して解析を進めようとするので、この形では著しく不便である。そこで砂堆頂部付近を対象に以下のようないずれかの近似解法を考えた。

式(7)の右辺第一項は境界層内の流れを加速する力である。この外力によって左辺が変化するが、加速されるに従って右辺第二項がこれを抑制するようになる。再付着点からある程度流下すると右辺のふたつの項の大きさは同程度となり、以後境界層内の運動量の変化はゆるやかになると思われる。これから推測して右辺第二項の変化は図-3 のようになるとと思われる。右辺第二項の値を右辺第一項の値で近似するとしてその相対誤差を考えると、非加速流では 100%、減速流では 100% 以上である。しかし加速流の場合はある程度流下すれば十分

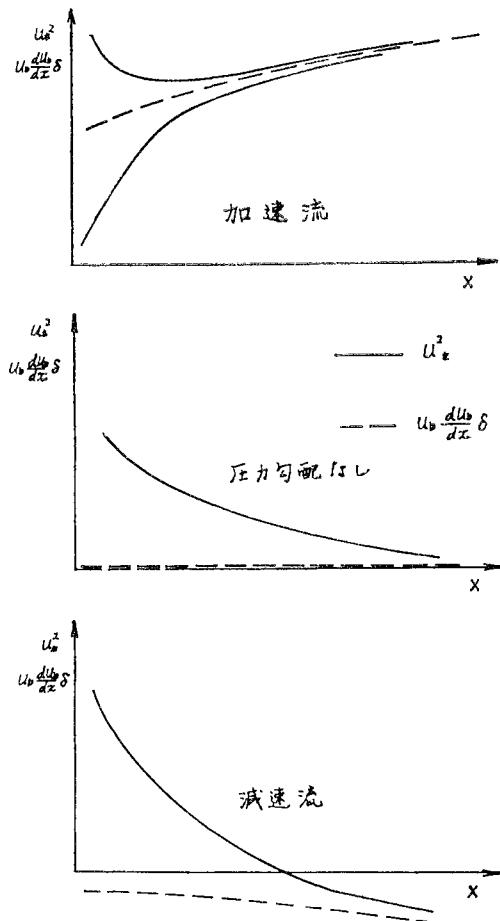


図-3 式(7) 右辺第一項と第二項の変化

な近似を与える可能性がある。砂堆上の流れは加速流であり、またここでは砂堆頂部付近を対象にしているので、ちょうどこの条件にあてはまるものと思われる。そこで式(7)の右辺の二項を等置する。

$$u_b \frac{du_b}{dx} \delta - u_{*0}^2 \approx 0 \quad \dots \dots \dots (8)$$

砂堆頂部付近では流速が一様化しているので境界層外流速  $u_b$  を断面平均流速  $\bar{u}$  で近似する。

$$u_b \frac{d\bar{u}}{dx} \delta - u_{*0}^2 \approx 0 \quad \dots \dots \dots (9)$$

境界層内の流速分布を対数則で表わせるとすれば、

$$\delta \approx y_0 \exp \left( \kappa \frac{\bar{u}}{u_{*0}} \right) \quad \dots \dots \dots (10)$$

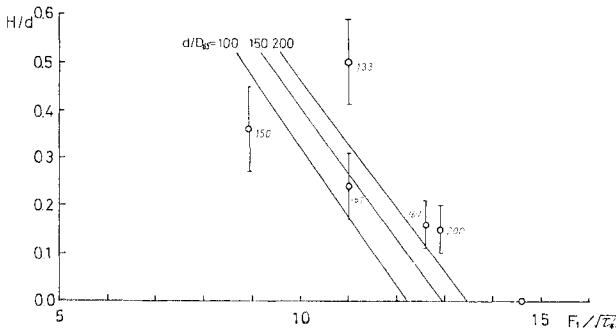
ここに、 $y_0$ : 対数則分布の零点高で粗度高さ  $k_s$  の  $1/30$ 。ゆえに摩擦速度について次の方程式を得る。

$$u_b \frac{d\bar{u}}{dx} \exp \left( \kappa \frac{\bar{u}}{u_{*0}} \right) - \frac{u_{*0}^2}{y_0} \approx 0 \quad \dots \dots \dots (11)$$

### d) 砂堆波高の算定式

平均河床面からの河床高を  $y$ 、 $y/d$  を  $\eta$  と書くと断面





### 図-8 実験結果

形成されていた。なお上流端で給砂していないために、上流側の 2~3 波長の水路床が低下する。また、上流側から次の波形が伝わっていないので、上流側の 2~3 波が他に比べて大きくなる。そこで、この部分のデータは除外した。

平衡状態に達したかどうかは、眼視観測と動水勾配の時間的な変化から判断した。

iv) 限界無次元摩擦力  $\tau_{*c}$

まず式(6)の妥当性を確かめるために次のような予備実験を行った。水深5cmで水路床を平坦にならした後通水し、徐々に流量を増して河床波を形成させる。さらに流量を増してゆくと河床波が吹き飛ばされて平坦河床となる。このときの流量と動水勾配を測定し、径深分割法注4)により底面摩擦力を算定した。この結果  $\tau_{*0} = 0.23$  が得られた。一方、式(5)から算定すると  $\tau_{*0} = 0.236$  となり、良く一致する。これから式(5)は矩形管路においても成立するものと思われる。

### v) 測定結果

測定結果と理論値とを図-8に比較する。測定値はかなり変動があるので平均値と標準偏差を記入してある。測定値の横に記してある数字は  $d/D_{65}$  の値である。本実験では  $d/D_{65}$  が 100~200 の間に入っているので、これに対応させて  $d/D_{65}=100, 150, 200$  についての理論曲線を引いてある。ただし波形勾配は本実験での平均的な値(0.075)を与えた<sup>注5)</sup>。この結果は必ずしも十分とはいえないが、減少域の波高の変化を式(16)である程度表わし得るものと考えられる。

### (3) 声とめ

流量の増大とともに波高が増大する領域と減少する領域を分けて考えた。増大域については Gill の式を用

注 4) 河床面の受けもつ抵抗についても対数抵抗則が成立するとして次式から求めた

$$\frac{v}{\sqrt{gR/J}} = 5.75 \log_{10}(12.27 Rbx/D_{65})$$

注 5) 本研究では、波長（または波形勾配）と水理量の関係を扱っていない。ここでは式(16)の妥当性を確かめるために波形勾配について実験結果を用いた。

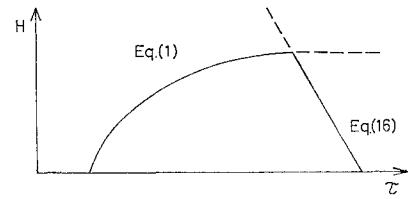


図-9 砂堆の波高の変化

いることができると思われる。減少域について  
 は、砂堆頂上で局所的に平坦河床と同じ状態が  
 生じているという仮説に基づき、波高を求める  
 式を誘導した。この式と実験結果とを比較した  
 ところ、減少域の波高の変化をある程度表わし得ること  
 がわかった。図-9に示すように、式(1)と式(16)か  
 ら求まる波高のうち小さい方が生じると考えられる。

### 3. 水位および流砂量の予測

本章では主線関係に関する理論のみを組み合わせてどの程度実現象を表現できるか、具体的な計算例を示すことにする。主線関係のうち①は文献7)で、③は文献8)で発表している。また④としては前章の結果を用いる。なお砂堆の波長については理論的には明らかでないので、ここではYalin<sup>3)</sup>が示している次式を用いることにする。

$$L=5\,d \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

### (1) 計算手順

文献 7) に示した式には式番号の頭に **A** を、文献 8) の式には **B** を、本論文の式には **C** を付けて区別する。次に手順を示す(図-10)。

- ① 水深  $d$  を仮定する。
  - ② **C**-式(17)から砂堆波長を求める。
  - ③ 砂堆波高  $H$  を仮定して **C**-式(6)から  $\tau_{*0}$  を求める。
  - ④ **C**-式(16)を満足する  $H$  を求める。
  - ⑤ ④で得られた  $H$  と ③で仮定した  $H$  が等しくなるまで ③～④を繰り返す。
  - ⑥ **B**図-16(a)～(g)を用いて  $c_f'$  を**B**-式(22)から  $c_f''$  を求め全抵抗係数  $c_f = c_f' + c_f''$  を求める。
  - ⑦ 全抵抗係数の定義式  $c_f = 2gd^2I/q^2$  から  $c_f$  を求める。ここに  $q$  は単位幅流量である。
  - ⑧ ⑥と⑦で得られた  $c_f$  が一致すれば、①で仮定した水深で水が流れることになる注6)一致しない

注 6) なお、図-13 に示す状態 (a) と状態 (b) の境目では、2 曲線が接するので、根の精度が悪くなる恐れがある。したがって、交点に対応する水深の前後の種々の水深について、 $c_f$  を計算してグラフにプロットして交点を求めるといい。

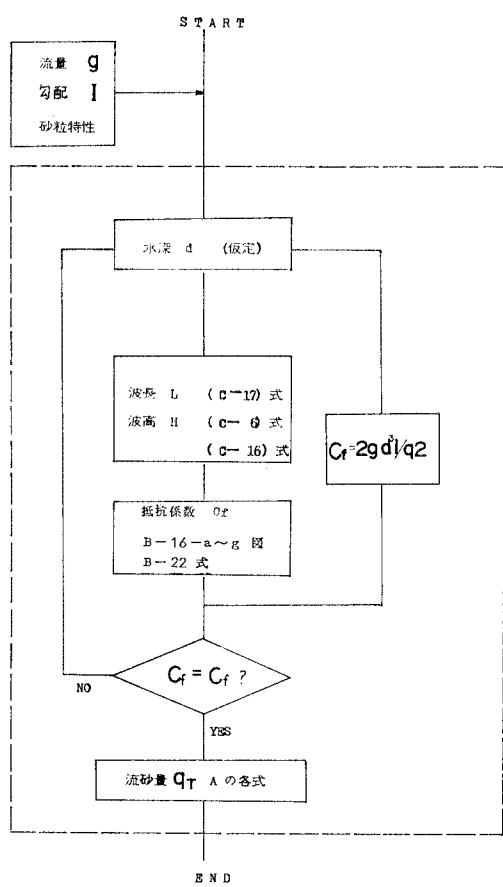
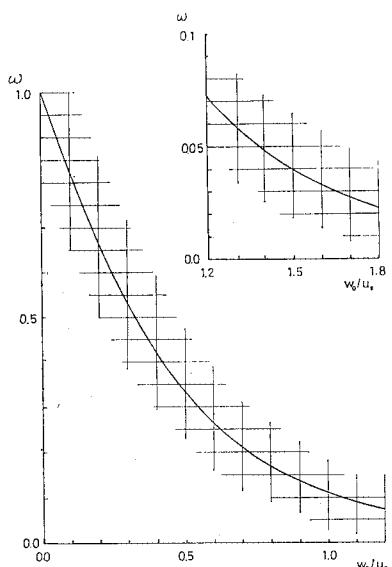


図-10 計算手順

図-11  $\omega \sim W_0/u_*$ 

場合は①に戻る。

以上で水理量が定まったので、次に流砂量を求める。

- ⑨  $u_* = \sqrt{gdI}$  から  $u_*$  を、 $\tau_* = u_*^2 / (\rho_s/\rho - 1)gD$  から  $\tau_*$  を求める。
- ⑩ A式(17)またはC図-11から $\omega$ を求める。
- ⑪ A式(22)またはC図-12から $f(\tau_*)$ を求める。
- ⑫ A式(33)およびA式(36)の下の式から $a$ ,  $\beta$ ,  $a$ ,  $b$ を求める。
- ⑬ A式(38)またはA式(39)から全流砂量 $q_T$ が求まる。

## (2) 計算例 1—水位・流量の関係

本方法で求まる解の一般的な性質について述べる。種々の水位について①～⑧の計算を行うと、図-13のようないくつかのグラフが得られる。実線部が2本の曲線で構成されているが、これは増減域(式(1))と減少域(式(16))にそれぞれ対応する。実線と鎖線の曲線の交点が求める水深を与える。

一般にある流量に対して1(a)ないし3(b)の水深を取り得る。種々の流量についてこのような図を描くと水位流量曲線が求まる。水位流量曲線は一般に図-14のように求まる。すなわち小流量では水位流量関

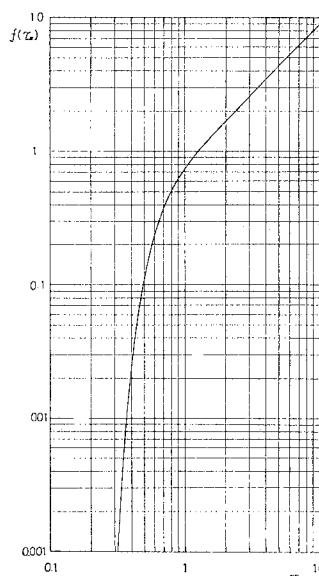
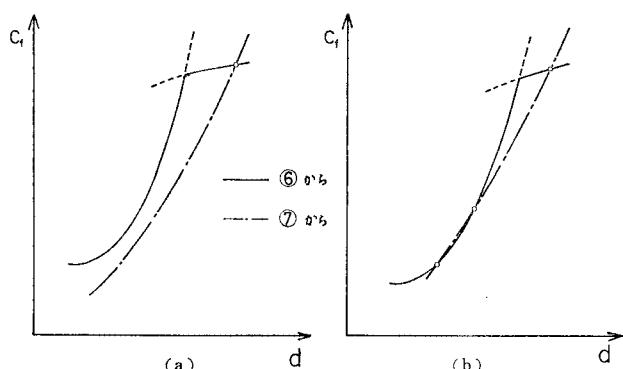
図-12  $f(\tau_*) \sim \tau_*$ 

図-13 抵抗係数の性質

係は一価であるが、ある流量より大きくなると水位の多価性が現われる。図中の区間 *a* が 図-13 (a) に、区間 *b* が 図-13 (b) に対応する。区間 *b* の上の曲線が増大域に対応しており、比較的大きな砂堆が形成されており、全抵抗のうち形状抵抗の占める割合が大きい。区間 *b* の下の 2 本の曲線は減少域に対応している。特に一番小さい水位を与える線はきわめて波高の小さな砂堆の場合に相当し、全抵抗のうち摩擦抵抗がほとんどである。

この水位の多価性が実現象とどのように対応するかは上の議論だけからでは明らかにできない。しかし從来経験的に得られている知見と対応させると、3 本の曲線のうち最大の水位を与える曲線が砂堆領域の水位流量曲線に、最少の水位を与える曲線が遷移領域またはそれに移行する領域の水

位流量曲線に対応するものと推測される。またかりにこの結果が正しいものとすると、水位流量関係が不連続的に変わる場合もあり得る。

図-15 は Shinohara & Tsubaki<sup>12)</sup> による斐伊川 (Igaya Point) での観測結果 (○) と計算結果 (—) を比較したものである注7)。測定された流量の範囲では水深の多価性は生じない (図-14 の (a) の区間にあたる)。計算値と測定値はかなり良く一致しているといえる。

図-16 は Shinohara & Tsubaki<sup>12)</sup> による斐伊川の人工水路 A での測定結果と比較したものである。この場合も水深の多価性は計算上生じていない。

図-17 は Guy et al.<sup>13)</sup> のデータを用いて検討したものである。彼らの実験は各 Run ごとに勾配を変化させて行われているが、そのうち同じ水路床材料でかつ水路勾配がほぼ同じ Run ( $I=0.00131 \sim 0.00136$ ) を選んでプロットした。なお計算では  $I=0.00134$  注7)とした。測定

注 7) 記載されているエネルギー勾配の平均値を河床勾配として計算した。

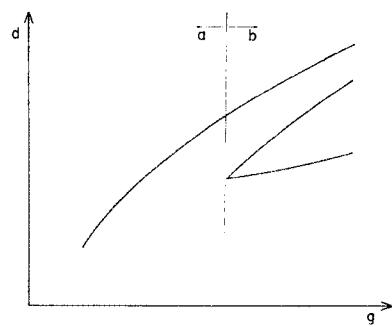


図-14 水位流量曲線の性質

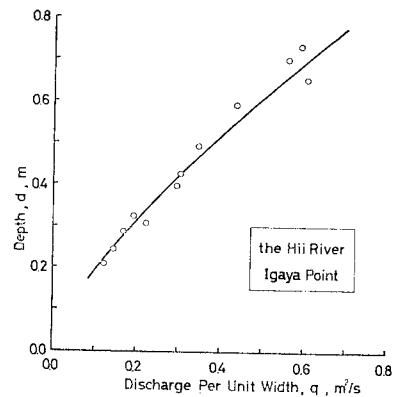


図-15 実測値と計算値の比較 (斐伊川)

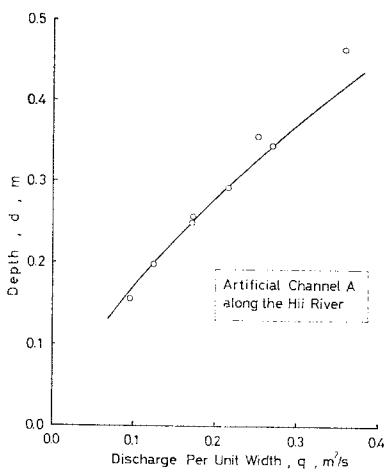
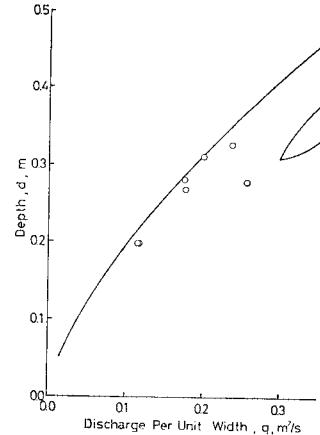
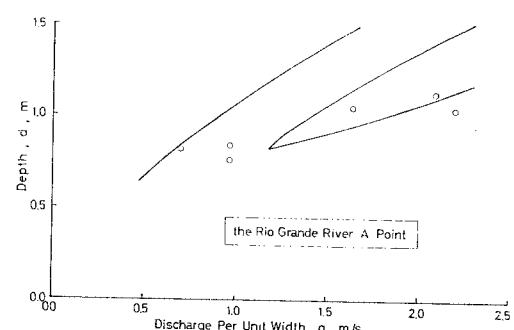
図-16 実測値と計算値の比較 (斐伊川  
人工水路A)図-17 実測値と計算値の比較 (U.S.G.S.  
8 feet 水路)

図-18 実測値と計算値の比較 (Rio Grande 川)

結果では  $q=0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  あたりで河床形態が変化し注8)，水深が減少している。一方計算上は  $q=0.3 \text{ m}^3/\text{s}$  あたりで水位の多価性が現われる。この測定された水位の減少と計算上の多価性とが対応すると考えられるが、量的には若干のズレがある。これについては後で検討する。

図-18 は Vanoni ら<sup>14)</sup>の論文に記載されている Rio

注 8) 測定者による河床形態分類では、図の一番右の点のみが Transition 他の点が Dune となっている。

Grande 川での測定データである。各測定ごとにエネルギー勾配や砂粒子径が異なっているが、計算では、それぞれの平均値を用いた。計算上は  $q=1.2 \text{ m}^2/\text{s}$  あたりから水位の多価性が生じるが、測定値は可能な最低水位の線上に載っている。 $q=1.0 \text{ m}^2/\text{s}$  付近の測定値が理論曲線からはずれているが、これについては後で検討する。

### (3) 計算例 2—流砂量・流量の関係

文献 7) で発表した流砂量算定式は次のような適用上の制約条件が付けられていた。

$$\tau_* > 0.3 \quad u_* D/v > 7.5$$

そこでこの範囲内に入る二例について計算を行った。

図-19 は、図-17 同じ Run のデータ<sup>13)</sup>に関して計算値と測定値を比較したものである。測定値とのズレは最大 2 倍程度であり、良く一致しているといえる。

図-20 は、Rio Grande 川のデータ<sup>13)</sup>について比較したものである。計算誤差は最大 3 倍程度まである。測定された流砂量が流量に対して多価性をもっている。測定されたエネルギー勾配が各ケースで異なっていることから、不等流の効果によって多価性が生じているものと思われる。すなわち、流砂量は底面せん断力の増加に伴って急激に増加するので、勾配の変化の影響は流砂量については顕著になると考えられる。本理論では等流を扱っているので、この多価性を表わすことはできない。

### (4) 検 計

本論文での方法によると、図-14 に示すように、ある程度流量が大きくなるとひとつの流量に対して 3 つの水位が求められる。最大の水位は砂堆が十分発達した状

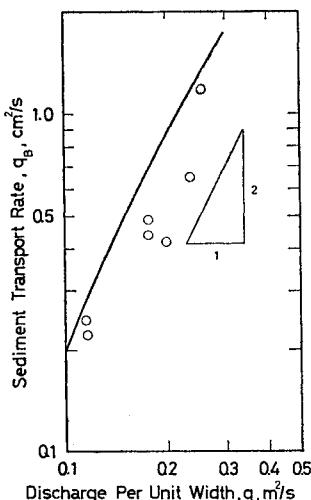


図-19 流砂量の実測値と計算値  
(U.S.G.S. 8 feet 水路)

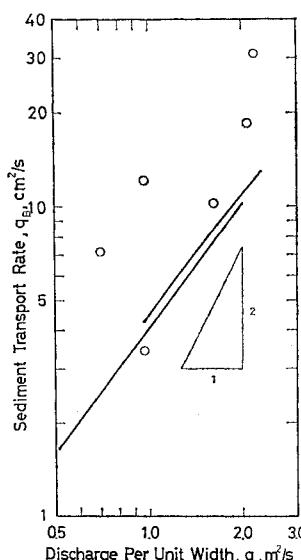


図-20 流砂量の実測値と計算値  
(Rio Grande 川)

態であり、残りのふたつの水位は遷移状態<sup>9)</sup>に対応すると考えられる。実際にどの水位が生じるかは過去の履歴や境界条件によると思われる。砂堆が十分発達した状態から遷移状態への移行は不連続的である。すなわち移行する場合には流量の増大に伴って水位が急激に減少する。

河床形態が遷移領域となり水位が減少する流量を見ると、計算結果は測定値よりも過大となっている。すなわち、図-17 では測定値が  $0.25 \text{ m}^2/\text{s}$  程度、計算値が  $0.3 \text{ m}^2/\text{s}$  程度、また 図-18 では測定値が  $0.8 \text{ m}^2/\text{s}$  程度、計算値が  $1.2 \text{ m}^2/\text{s}$  程度となっている。この原因は次のように考えられる。図-13 に示したように、可能な水深のうち小さい方のふたつは重根に近い。したがって抵抗係数の見積りの誤差が拡大されることになる。文献 8) で述べた抵抗係数の計算法は流れを厳密に解析して得られたものではないので若干の誤差は免れにくい。同論文に示した著者らの実験結果では、特に摩擦抵抗の算定が多少大きめになっている。これをさらに正確に算定できるとすれば下の 2 本の水位流量曲線はもう少し左方に移動し測定結果と一致するものと思われる<sup>10)</sup>。

このことは計算結果の不安定性のみならず、現象自体の不安定性をも示しているものと思われる。砂堆の形状は不規則性をもっているので、同条件でも抵抗係数にはばらつきがあるはずである。小さい方の水位に対応する根が現われるか虚根となるかはこの不規則性に左右されると思われる。したがって遷移状態に移行する流量は完全にひとつの値には定まらないと考えられるからである。

流砂量の予測値は最大 3 倍程度の誤差を生じている。

これは水理量の予測値がすでに誤差を含んでいることと、文献 7) の流砂の算定式が 2.5 倍程度までの計算誤差を生じる恐れのあることによる。図-1 の ⑥ の関係を適切に考慮することができれば、さらに精度を向上させられるものと思われる。

### 4. おわりに

本研究では移動床流れを 図-1 のような系としてとらえ、主線関係 ①, ③, ④ を解析的に取り扱った。河床波形特性をひとつの要素として現実に即した形で解析を行っている点で従来の総合理論と異なっている。本論文では、まず ④ の関係について考察し、すでに発表して

注 9) lower regime から upper regime への遷移の状態で、砂堆が消えかかっている状態。

注 10) 摩擦抵抗の算定が一割程度大きめだと考えると、計算値と測定値はほぼ一致する。

いる①, ③についての理論を総合して砂堆河床の水位と流砂量の予測法を示した。本論文での取り扱いには仮説や推論が含まれており、また傍線関係を無視しているので、必ずしも理論的に十分とはいえない。しかし結果は定性的にも定量的にも実現象をよく説明しており、このような取り扱いが少なくとも大筋において妥当なものであると考えられる。主線関係についてのさらに詳細な検討および傍線関係を考慮した適切な補正が行われれば、移動床流れの各水理量をさらに適確に予測できるようになると思われる。

## 参考文献

- 1) Einstein, H.A. and N.L. Barbarossa : River Channel Roughness, Trans. ASCE, Vol. 117, pp. 1121~1146, 1952.
- 2) Shen, H.W. : Development of Bed Roughness in Alluvial Channels, Jour. of the Hydraulics Div., ASCE, Vol. 88, No. HY 3, pp. 45~58, May, 1962.
- 3) Engelund, F. : Closure to "Hydraulic Resistance of Alluvial Streams", Jour. of Hydraulics Div., ASCE, No. HY 4, pp. 287~296, June, 1967.
- 4) Alam, M.Z. and J.F. Kennedy : Friction Factors for Flow in Sand-Bed Channels, Jour. of the Hydraulics Div., ASCE, Vol. 95, No. HY 6, pp. 1973~1992, Nov., 1969.
- 5) Yalin, M.S. : Geological Properties of Sand Waves, Jour. of the Hydraulics Div., ASCE, Vol. 90, No. HY 5, pp. 105~119, Sept., 1964.
- 6) Gill, M.A. : Height of Sand Dunes in Open Channel Flows, Jour. of the Hydraulics Div., ASCE, Vol. 97,
- No. HY 12, pp. 2067~2073, 1971.
- 7) 吉川秀夫・石川忠晴：流砂運動のモデル化とそれに基づく流砂量の算定法について、土木学会論文報告集, 第 269 号, pp. 25~36, 1978 年 1 月.
- 8) 吉川秀夫・石川忠晴：砂漣・砂堆上の流れの抵抗について、土木学会論文報告集, 第 281 号, 1979.
- 9) 石川忠晴：断面急変に伴う剝離領域の下流部の流れと底面せん断力について、土木学会論文報告集, 第 257 号, pp. 21~29, 1977.
- 10) 中川博次・辻本哲郎：水流による砂礫の移動機構に関する研究、土木学会論文報告集, 第 244 号, pp. 71~80, 1975.
- 11) Garde, R.J. and K.G.R. Raju : Resistance Relationships for Alluvial Channel Flow, Jour. of the Hydraulics Div., ASCE, Vol. 92, No. HY 4, pp. 77~100, July, 1966.
- 12) Shinohara, K. and T. Tsubaki : On the Characteristics of Sand Waves Formed Upon the Beds of the Open Channels and Rivers, Rep. of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu Univ., Vol. 7, No. 25, 1959.
- 13) Guy, H.P., D.B. Simons and E.V. Richardson : Summary of Alluvial Channel Data from Flume Experiments 1956-61, Geological Survey Prof. Paper 462-I, U.S. Government Printing Office, Washington, 1966.
- 14) Vanoni, V.A. and N.H. Brooks : Laboratory Studies of the Roughness and Suspended Load of Alluvial Streams, Report No. E-68, Sedimentation Laboratory, California Institute of Technology, Dec., 1957.

(1978.5.25・受付)