

移動床流れの粗度と河床形状

(司会) 林 泰 造*
 総括執筆者 足 立 昭 平**
 話題提供者 芦 田 和 男***
 同 鮭 川 登****
 同 岸 力*****
 同 土 屋 昭 彦*****

はじめに

地表を流れる水は土砂を流送し、流水自身が運搬・堆積した土砂の上にその流路を形成する。流水の運動は流路の形態に大きく支配され、一方、その形態は流水の作用によって形成されるから、両者のどちらか一方だけを独立に取り扱うことはできない。このような土砂流送を伴う流れ、流砂および流路変動を対象とする Alluvial hydraulics は、水理学の未完の分野として、近年とみに活発な研究が進められ、その発展が期待されているものである。本研究討論会においては、そうした Alluvial hydraulics の中で、なお実証面に難点を残していると思われる流砂量を除いて、ある程度固まりつつあると思われる流れの抵抗則および河床形態を取り上げて、それらの問題点の所在を確かめ、今後の研究の指針および従来諸成果の実際問題への適用に役立てることをめざした。

なお、昭和 45 年度末から、土木学会水理委員会の研究活動の一つとして、水理学における主要課題を逐次取り上げて、その研究の発展経過および最近の動向と成果をとりまとめて会員に報告するための研究小委員会が設けられた。その最初の課題が「移動床流れの粗度と河床形状」である。この研究小委員会^{a)}は、既発表の論文・

公式・関係式および資料の分類、比較検討、信頼性、研究の方向などをさぐることを作業内容とし、移動床流れの抵抗則と河床形態に関する二課題について、46 年度末までの 1 年間を期限として作業が進められている。本課題の選定はそうした学会の研究活動をいっそう効果的なものとする意味も含められており、話題提供者として、その小委員会の岸・土屋・芦田および鮭川の各委員がそれぞれの担当課題について、話題を提供することになった。話題提供者の課題はつぎのようである。

移動床流れの抵抗則

- 岸 力 (北海道大学工学部)
- 河床の実測値からみた粗度係数と河床形状
- 土屋昭彦 (建設省土木研究所)
- Sand Waves の統計的構造と Sand Waves 上の流れ
- 芦田和男 (京都大学防災研究所)
- 河床形態の形成領域と発生機構
- 鮭川 登 (早稲田大学理工学部)

1. 移動床流れの抵抗則

この課題のねらいは、任意の流路において、流量と河床材料が与えられるとき、流速・水深を予測することの可能性と、精度を検討することである。話題提供者・岸は、平均流速の対数式によってこの問題の筋道を明らかにするとともに、これまでに発表された移動床流れに対する抵抗実験式を分類し、多くの実測資料に基づいて、それらの適用範囲および精度を検討した結果を示し、移動床粗度の問題点を明らかにした。その内容を以下に紹介する。

(1) 移動床流れの抵抗実験式

流路の流速および水深が予測できるためには、まず、その流路における流体抵抗を知らねばならない。微視的

* 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科
 ** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
 **** 正会員 早稲田大学助教授 理工学部土木工学科
 ***** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科
 ***** 正会員 建設省土木研究所河川研究室 室長
 a) 移動床流れの粗度と河床形状に関する研究小委員会
 委員長: 林 泰造
 移動床の抵抗グループ: 岸 力 (主査)・足立昭平・杉尾裕三郎・土屋昭彦・田中祐一朗・福岡健二・山口 甲・紀陸富信
 河床形態グループ: 芦田和男 (主査)・椿東一郎・鮭川 登・白砂孝夫・道上正規・馬場洋二・長谷川和義

には、流体抵抗は流水の速度勾配に関係づけられる粘性応力あるいは乱流の Reynolds 応力であるが、流路の抵抗は流水断面に関する平均量を対象とするものであるから、その関係式は流水断面の速度分布の積分形として与えられる。移動床流れは必ずしも 2 次元ではないが問題の筋道を明瞭にするため、2 次元乱流の対数速度分布を取り上げれば、平均流速の対数式として知られている抵抗式

$$\frac{V_m}{V_*} = \frac{1}{K} \left(A + \ln \frac{R}{k} \right)$$

が導かれる。ここに、 V_m は平均流速、 V_* は摩擦速度であって、河床の平均せん断応力 τ_0 と流水の密度 ρ に対して $V_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ で定義される。また、 K は乱流の混合機構に関する Kármán 定数、 A は積分定数、 R は径深、 k は河床粗度の尺度である。 A および k は河床形態などの流水断面に関する積分条件によって定まるものであるが、砂粒粗度に対する Nikuradse の実験に準拠して、 $A=8.5$ を採用して k を等価砂粒粗度 k_s におきかえれば次式で書き表わされる。

$$\frac{V_m}{V_*} = \frac{1}{K} \left(8.5 + 2.3 \log_{10} \frac{R}{k_s} \right) \dots\dots\dots (1)$$

V_m/V_* は、流水の慣性力と河床の抗力との比、あるいは流水の運動エネルギーと河床抗力による損失エネルギーとの比と解釈される無次元係数であり、いわゆる抵抗係数 f あるいは Manning の粗度係数 n は

$$f = 8 \left/ \left(\frac{V_m}{V_*} \right)^2 \right. \dots\dots\dots (2)$$

$$n = \frac{R^{1/6}}{\sqrt{g}} \left/ \left(\frac{V_m}{V_*} \right)^2 \right. \dots\dots\dots (3)$$

のように表わされる。

流路の流量が与えられれば、(V_m , R) の関係は流路横断面の幾何学的条件で定まり、また、流水のエネルギー勾配を I とおけば、流水の力学条件から

$$\tau_0 = \rho g R I \text{ すなわち } V_* = \sqrt{g R I} \dots\dots\dots (4)$$

である。したがって、さらに河床材料が既知であるときに、式(1)の K および k_s を与える関係式が見出されれば、設問に対する解答が得られることになる。

流砂がなければ、 $K=0.4$ は普遍定数と見なされ、また、平坦な砂礫河床の k_s は底質砂粒径 d に決定づけられる。しかし、移動床水路の場合にはかなり複雑である。すなわち、同一の河床材料であっても、水理条件によって河床形態が変化し、 k_s は d だけでは定まらない。また、 K も流砂濃度が増大すれば減少する。このように、複雑な移動床流れの抵抗を記述する実験式の考え方には全抵抗を対象として、次元解析によって k_s の実験式を探究するものと、抵抗を底質砂粒による表面抵抗と、河床形態による形状抵抗に分けて取り扱うものがある。なお、移動床水路の平均流速式を Chézy 式、Manning 式

にならって指数形で仮定し、実用的に簡便な新しい経験係数を設定しようとする試みは、全抵抗の実験式の特徴形とみることができる。

(2) 全抵抗の実験式

椿・古屋¹⁾は、いくつかの河川の実測資料から

$$\log_{10}(k_s/d_m) = 3.48(1 - 0.225 \tau_*)^{-1/2} \dots\dots (5)$$

を提案している。実測値との比較によれば、式(5)の適用範囲は $F_r \approx 0.3$ で河床が ripples あるいは dunes の場合に限られる。ここに、 τ_* は掃流力の無次元尺度であって

$$\tau_* = V_*^2 / (\sigma/\rho - 1) g d_m$$

で定義される。 σ は底質砂粒の密度、 d_m は平均粒径である。

芦田²⁾は、 k_s が τ_* のほかに Froude 数 $F_r (= V_m/\sqrt{gR})$ にも関係すると考えて

$$k_s/d_m = f(\tau_*) F_r^{-2} \text{ or } f(RI) F_r^{-2} \dots\dots\dots (6)$$

を提案している。 F_r の導入が注目されるが、実験的関数として与えられている $f(\tau_*)$ の自然河川に対する適合性は十分ではない。

吉川・椎貝・福岡³⁾らは、流砂濃度による K の変化を考慮して

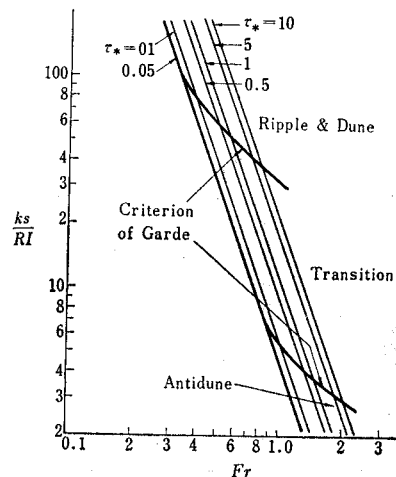
$$k_s/RI = 18 F_r^{-2.25} \dots\dots\dots (7)$$

を提案している。話題提供者・岸は、式(6)および式(7)の形式を参照して、多くの実測資料から

$$k_s/RI = 10.8 \tau_*^{0.27} F_r^{-2.76} \dots\dots\dots (8)$$

を導いた。式(8)では $K=0.4$ とし、その変化は見掛上 k_s の中に含まれるが、 $\tau_* > 0.05$, $F_r < 0.6$ の範囲で実測値にかなりよく適合する。しかし、さらに適用範囲を広げるためには、まだ、多くの検討を要する。

この種の実験式の適用範囲は、河床形態に無関係では



図一 移動床水路の河床形態区分(Garde)と等価砂粒粗度(式(8))

ないと考えられる。河床形態区分として Garde の区分法を取り上げ、式(8)との対応を図示すれば図-1のようであり、 $\tau_* = 0.05$ は底質砂粒の移動限界と考えられるから、流水の抵抗特性が河床形態に対応して変化するものとするれば、 $F_r < 0.4$ の ripples, dunes 領域で、 V_m/V_* は τ_* の増大とともに単調に減少し、 $1.0 < F_r$ の antidunes transition から移行する領域で、 V_m/V_* は τ_* のある値で極大値を持ち、両者の推移区間 $0.4 < F_r < 1.0$ では、 V_m/V_* と τ_* の関係が不安定で確立しにくいものと推測される。このことは、従来の実験式の適用範囲を検討するうえに有力な手がかりを与えるものと考えられる。図-2 は、実測資料を $(k_s/d_m, F_r, \tau_*)$ の関係で整理した結果であり、図中の破線を採用すれば $F_r < 0.6$ の範囲で実測値をかなりの精度で表わすことができ、 $F_r > 0.6$ の場合には、抵抗係数 f にして実測値は計算値の 0.7~1.4 倍、Manning の粗度係数 n にすれば約 $\pm 20\%$ の推定誤差を生ずる。

(3) 抵抗分離の実験式

移動水路の粗度を底質砂粒による表面抵抗と河床形態による形状抵抗に分けて扱う方法には、径深を2成分に分割する方法と、エネルギー勾配を2成分に分割する方法がある。前者は Einstein の提案に始まるものであるが、径深分割の物理的意味が不明瞭であり、後者のエネルギー勾配分割のほうが合理的であると考えられている。抵抗係数 f は

$$I = f/V_m^2/2gR$$

で定義されるから、分割されたエネルギー勾配に対応して、表面抵抗に対する抵抗係数を f' 、形状抵抗のそれを f'' とおけば、全抵抗の抵抗係数 f は

$$f = f' + f'' \dots\dots\dots(9)$$

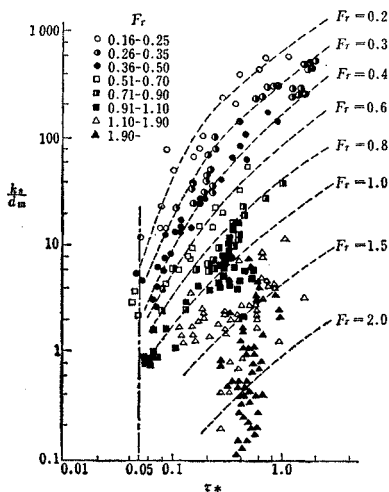


図-2 実測資料による移動水路の等価砂粒粗度

で与えられる。

Kennedy⁴⁾ は、 f' に対して Moody 線図を修正して、 $f'(R/d_m, V_m R/\nu)$, f'' を $f''(R/d_m, F_r)$ で表わしている。実測値の適合性は径深分割による実験式よりも優れているが、全抵抗の実験式を参考にすれば、 $f''(\tau_*, F_r)$ とすることも考えられる。

Vanoni⁵⁾ は、 f' に対して式(1)を、 f'' に対して sand waves の平均波高 H と平均波長 L を用いて

$$1/\sqrt{f''} = 3.3 \log_{10}(LR/H^2) - 2.3 \dots\dots\dots(10)$$

で表わした。わが国の河川の実測資料によれば、式(10)の係数 3.3 は 4.31 に、定数 2.3 は 4.8 に修正するほうが好ましいようであるが、実測値との適合度は 0.8~2.0 の程度でかなり良好である。式(10)では、 H と L を与えねばならないが、それらを与える実験式として Yalin⁶⁾ の

$$\left. \begin{aligned} H/h_c &= \frac{1}{6}(h/h_c - 1) \text{ or } = \frac{1}{6}(1 - \tau_c/\tau_0) \\ L &= 5h(V_* d_m/\nu \geq 20), \\ &= 1000 d_m(V_* d_m/\nu < 20) \end{aligned} \right\} \dots\dots(11)$$

がある。ここに、 h_c は底質砂粒の限界掃流力 τ_c に対応する水深であり、 ν は水の動粘性係数である。この式はかなり大胆な実験式であるが、 F_r の小さい範囲に適用される。

抵抗分離の実験式も、まだ河床形態およびその上の流れの内部機構の解明に待つところが多く、実用的に十分な抵抗実験式を得るまでには、まだかなりの道程を残している。しかしながら、この種の実験式は移動床流れの有力な抵抗実験式と考えられており、その進展が期待される。

(4) 今後の課題

本課題の中で指摘された今後の研究課題を列挙すれば次のようである。

- ① 流路形状および流れの3次元性を考慮すること。抵抗則の記述として、3つの無次元量 $(k_s/d_m, F_r, \tau_*)$ の関係式で十分であるのかどうかの検討。
- ② 底質砂粒の混合特性あるいは流砂濃度による K の変化を見かけ上 k_s に含めることの可否。
- ③ 抵抗係数を決定論的な量と見なさない立場からの考察。その場合には、個々のパラメーターの統計的特性が問題とならう。

なお、水理学的な根拠に乏しいきらいはあるが、実用上の簡便さを主眼とする指数型平均流速式も、現実に決定的な実験式を望めない現段階ではその実用的意義を軽視できない。この種の経験式として杉尾⁷⁾は

$$\left. \begin{aligned} V &= 54 R^{0.54} S^{0.27} (d \text{ が小さく, 緩勾配, ripples)} \\ &= 80 R^{0.54} S^{0.27} (d \text{ が大きく, dunes)} \end{aligned} \right\}$$

$$=110 R^{0.54} S^{0.27} (d < 0.3 \text{ mm, 流量大, transition or antidunes}) \quad (12)$$

を提案しているが、さらに付け加えて、同一河川において式(12)の3式間の転移が認められ、それらが河床形態の変化に関連しているように考えられることの報告がなされた。

2. 河川の実測値からみた粗度係数と河床形状

上記課題に引続いて、ここでは実際河川における粗度係数の実態および河床形状の観測が取り上げられ、話題提供者・土屋は建設省で行なった観測例から、現実の移動床河川における流水抵抗の複雑さを提示した。以下これを紹介する。

(1) 実河川の粗度係数

河川の実測資料から粗度係数 n を求める方法としては

① 流量観測資料(流速・水深の実測)から求める方法

② 観測所の水位・流量を用いて、 n の値を仮定して得られる不等流計算の水位と実測水位が一致するように n の値を定める方法

③ 洪水痕跡水位に基づいて、不等流計算によって n の値を算定する方法

の3方法がとられている。これらの方法のうち、②、③は河川計画などに使用される粗度係数を対象とするものであり、河床形状のほかに河川断面形の縦断変化による抵抗も含むから、河床形状と粗度との関係を調査する場合には、①の方法によらねばならない。

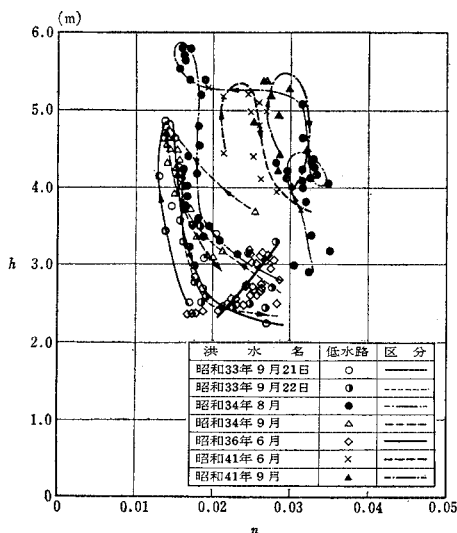


図-3 川俣(低水路)における n の変化

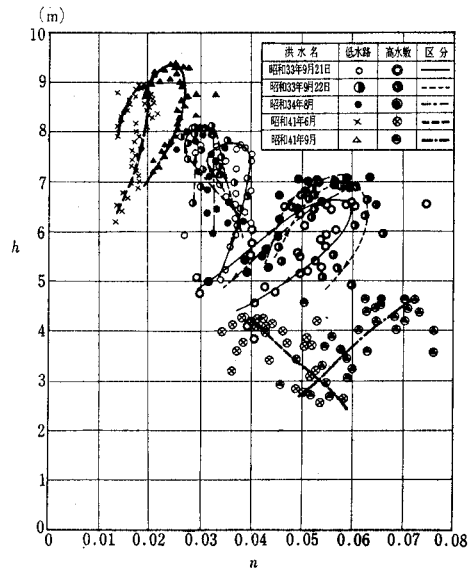


図-4 取手における n の変化

図-3 および図-4は、利根川の川俣および取手観測所における流量観測資料から n を求めたものである。流量観測は低水路および高水敷上で浮子を用いて行ない、河床横断は洪水後の測量による。図中の矢印は、洪水の時間経過を示しており、川俣の場合には出水初期に粗度が大きく、流量増加とともに減少し、洪水ピーク以後はほぼ一定となり、最後にまた増加する傾向を示している。これに対して、取手の記録は最初粗度が小さく、流量増とともに粗度がふえて、また減少する傾向を示している。流量増加とともに sand waves が発達するものと考えれば、取手の傾向は説明できるが、川俣の傾向は説明できない。

川俣の n の変化を浮子観測の測線ごとに求めて、横断方向にその値を調べた結果によれば、低水路における n は小さく、この断面では高水敷と低水路の n の差がこうした傾向としてあらわれたものと推測される。洪水の時間経過とともに n の値が変化することは、よく伝えられているところであるが、その変化の特性が断面によって異なることに注意しなければならない。

(2) 河床形状

図-5は江戸川における中洪水時の河床形状の一例である。この測定は、超音波測深機を無人ボートに乗せて測定したものである。この場合の平均波長は $L=5.55$ m、平均振幅は $H/2=0.32$ m であった。式(11)の Yalin の実験式による計算値は、 $L=23$ m、 $H=77$ cm を示し波高はほぼ一致するが、波長には相当の差がある。

わが国の河川では洪水時に船を用いることが危険であるため、この種の測定はまだ数少ない。出水後の河床形

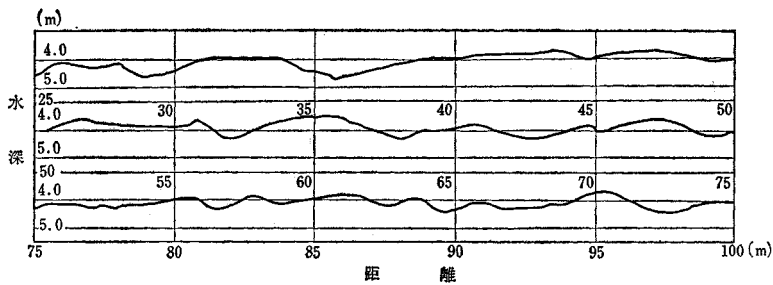


図-5 江戸川野田における河床形状の実測例

状を測定して出水中の水理量と対応させた例として、斐伊川・豊川の測定がある。それらの対応には若干の無理があるが、その結果は江戸川の場合と同様に、Yalin の実験式の精度は、波高に対して比較的良好であるが、波長については計算値がかなり大きい値を与える。また波高と等価砂粒粗度との対応関係は十分といえないまでも比較的良好である。実河川の実測値をとおして、粗度係数に及ぼす河床形状の寄与を抽出することはかなりむずかしい作業ではあるが、河床形状の実測資料の集積が当面の課題といえよう。

3. Sand Waves の統計的構造と Sand Waves 上の流れ

河床に形成される sand waves がどのような機構で発生・発達し、また、どのような統計的構造を持ち、さらにその上を流れる流水の速度分布および乱れの構造がどのような特性を持つかという問題は、移動床水路の粗度あるいは流砂の問題を考える際に基礎的概念を提供するものとして重要である。いうまでもなくこれらの問題はきわめて複雑で、まだ十分な解明を見ていないが、移動床水理学の基礎的課題として研究が続けられており、これまでに得られた実験的知見も少なくはない。話題提供者・芦田はそれらの論点をまとめ、今後の研究に対する問題点を列挙した。

(1) 問題点とその検討

話題提供者・芦田の提示にしたがって論点をあげれば以下のようなものである。

a) 河床形状のスペクトル密度は、水路幅および水深に規定されると考えられる波数領域において卓越し、両者は異なる特性を示す。前者は bars に、後者は dunes に対応するように思われる。また、ripples と dunes の区別は、河床砂粒に働く粘性力がその発生・発達に影響を有するか否かによるという主張もある。これらの推論が妥当であるかどうか第一の論点である。

これらの推論に対して否定的な意見はなく、むしろ相

異なる形態の共存状態の存在が ripples, dunes および bars の発生原因の相違を裏づけているとする見解が有力であった。

b) 河床形状のスペクトルの高周波域には、時間的・空間的に変化しない統計的状态、すなわち平衡領域が存在すると考えられている。第二の論点は、その物理的な構造の解釈である。

この点について、sand waves の斜面勾配が河床砂粒の安息角を越えることができないために、波数がある値以上になると砂粒の安息角によって波数スペクトルが決定づけられ平衡領域が存在するという日野の見解と、砂粒の安息角だけでは平衡領域のスペクトルレベルの差異までは説明しにくいという質疑が提出された。この問題が河床形状の幾何学的要件だけによるものであるかどうかは興味深い問題であり、今後の研究の進展が待たれる。また、sand waves のスペクトルの平衡領域におけるエネルギーの消散過程について、短波長の sand waves から長波長のそれへの移行する形式が考えられるなどの見解が述べられた。

c) sand waves の発生・発達に対する考え方として、流水の乱流構造に着目するものと、流水と河床の境界面の不安定性に着目するものがある。昭和 46 年 8 月パリで開催された国際水理学会においても両者の是非論がはげしく論ぜられたが、これらの考え方が互いに矛盾するものであるか、あるいは両者あいまって問題の本質を説明するものであるかが第三の論点である。

この問題は、次の河床形態の発生機構につながるものであるが、本討論会では両者がともに成立するという見解に対する支持が多いように受けとられた。

d) sand waves 上の流れの流速分布や乱れの強さの分布は、後述のように固定床段落ち部のそれと類似していると考えられている。また、河床形状の発達と乱流構造の変化とは密接な関係があると考えられるが、両者の対応はけっして単純ではない。芦田・奈良井の実験によれば、河床形状のスペクトルのパワーが増大するにつれて、同じ波数域での乱れのエネルギーは逆に減少する。一方、白砂の実験によれば、河床形態の存在する領域で乱れのエネルギー・スペクトルの平衡領域に飛躍が見られる。これらの特性と sand waves の発生との関連、流水抵抗あるいは流砂機構との関連が第四の論点である。

これらの論点に対して、とくに、新しい知見は加えられなかったが、移動床流れの抵抗則および河床形態の解明に関する重要な基礎研究として、今後の進展が期待される。

(2) 参考資料

a) sand waves 上の平均流速と乱れの強さの分類⁹⁾

図-6 は Raudkivi の段落ち部流れの測定結果である。乱れの強さは段落ち部下流で増加し、主流が河床に衝突する付近で最大となり、それより下流で減少する。Raudkivi は、移動床においてなんらかの原因で砂粒面に段落ちが起これば、図-6 と同様の現象が現われて、後流領域の末端付近の砂粒が巻き上げられ、乱れの強さが減少する下流部に堆積して第二の段落ちを形成し、sand waves が逐次発達すると考えている。

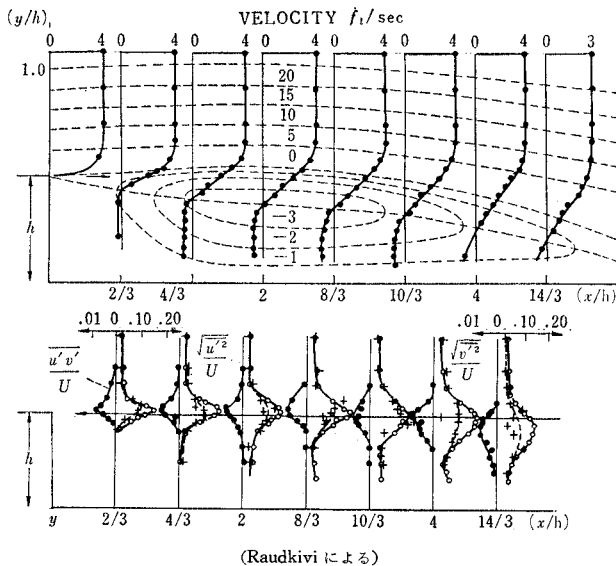


図-6 段落ち部の平均流速および乱れの強さの分布

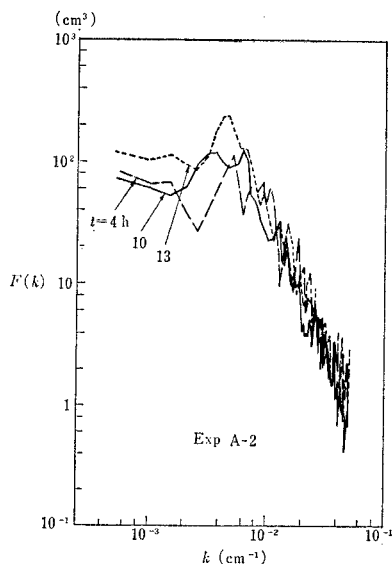


図-7 河床形状のスペクトル密度

b) sand waves の統計的構造と乱流構造の変化⁹⁾

図-7 は、水路幅を2種類、水深を数種類変えて、河床形状のパワースペクトルを調べた芦田・奈良井の実験結果の一部である。

その実験結果を要約すれば、

① $0.1 < k \cdot h$ (k : 波数, h : 水深) の波数領域で、dunes あるいは ripples が形成され、スペクトルの平衡領域を形成する。 F_r が1に近いとき、 $k \cdot h = 0.2 \sim 0.3$ の波数の水面波を伴う変動成分が卓越する。

② $0.1 < k \cdot B < 0.5$ (k : 波数, B : 水路幅) の波数領域で、transverse bars が形成される。この領域は、

① の平衡領域が達成されたあとに発達する。

③ 上記の2つの河床形態とは、構造的に異なる縦条の形態が発生する。

④ これらの3つの相異なる特性を持つ各領域は共存しうる。

図-8 は 図-7 に示した河床形状の発達に対応する乱れのエネルギースペクトルの変化を示したものである。実験条件は、流量 20 l/sec, 勾配 1/500, 水深 8.6 cm, 流速 38.8 cm/sec, 水路幅 60 cm であるが、図-7 の bars が発達する領域に対応して、図-8 の乱れエネルギースペクトル密度は減少している。

4. 河床形態の形成領域と発生機構

前課題に引き続いて、ここでは河床形態が取り上げられ、話題提供者・鮎川は河床形態の分類、その形成領域の区分および発生機構に関する研究の現状と問題点を示し、とくに、河床形態の規模および3次元性に対する評価を、主要な論点として提示した。

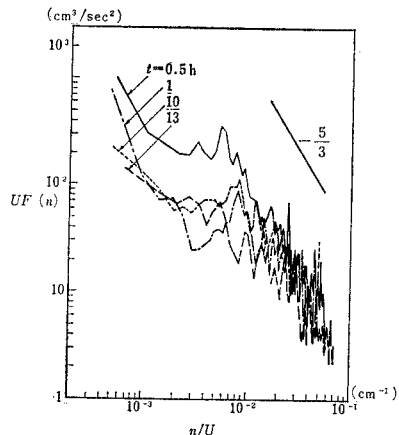


図-8 移動床上の乱れエネルギースペクトル密度

(1) 河床形態の分類と形成領域の区分

河床形態は流れの抵抗, 流砂などと密接な関係があり, その分類は移動床水路における現象を論議する際の基点の一つである。表-1 は実験水路における観測から河床形態を分類したものであり, 表-2 は河床形態の発生理論における水面波との関係および移動方向によって分類したものである。

表-1 河床形態の分類・その1

名称	形状・流れのパターン		移動方向	備考
	縦断図状	平面図		
Ripples			下流	●長さ<30cm, 高さ<3cm ●粒径が0.6mm以上のときはほとんど形成されない
Dunes			下流	
Transition				●ripples, dunes, flatbedが混在する ●河床面全体に高さの低い, 波長の長いripplesやdunesが存在する
Flat Bed				(粒径が粗い場合には形成されない)
Antidunes			停止 上流	Standing Waves
Chutes and Pools			上流	
Bars				●長さ>河幅 ●高さ~平均水深
			下流	Alternating Bars
			下流	Transverse Bars
			下流	Linguoid Bars

表-2 河床形態の分類・その2

区分	名称	水面波との関係	移動方向
二次元河床形態	Dunes	逆位相	下流 (停止*) (上流*)
	Flat Bed		
	Antidunes	同位相	下流* 停止 上流
三次元河床形態	Alternate Dunes	逆位相	下流
	Flat Bed		
	Alternate Antidunes	同位相	上流

注: *印は, この河床形態の存在は実験によっては確認されていないことを示す。

このような種々の河床形態がどのような条件のときに形成されるかを予測することは, 移動床水路に関する命題として, 古くから研究されてきたところである。河床形態の発生・発達機構が解明されれば, この命題は解けるわけであるが, まだその段階にまで至っていないから, 実際問題としては河床形態の形成領域の区分は, 実験値を次元解析によって整理する方法によっている。それらの代表的区分法として, Garde-Albertson¹⁰⁾ の ($\tau_* \sim Fr$), 杉尾¹¹⁾ の ($I \sim \tau_*$), Garde-Raju¹²⁾ の ($I/(\sigma/\rho - 1) \sim R/d$) がある。これらは主として2次元の形態を対象とするものであるが, さらに流路の規模を考慮して3次元の形態を合わせて区分する試みとして, 鮎川¹³⁾ の ($V_*^2/V_{*c}^2 \sim \sqrt{gB} I/V_{*c}$) があげられた。ここに, V_{*c} は河床砂粒の移動限界摩擦速度である。

河床形態の形成に関する実験観察によれば
① 掃流力 ($\tau = \rho U_*^2 = \rho gRI$) が大きくなるにつれて, (ripples, dunes) → (transition) → (flat-bed) → (antidunes) と変化する。
② 掃流力が同一の場合でも, R と I の組合せ方によって異なる河床形態が形成されることがある。
③ 河床形態の形成限界を与える I や Fr の値は, 河床材料や流路の大きさにも影響される。

などが認められている。これらの実験事実を考慮し, σ, ρ および g を定値とみなし, 2次元形態を対象として河床形状のある長さの尺度 k で代表できるものとすれば

などが認められている。これらの実験事実を考慮し, σ, ρ および g を定値とみなし, 2次元形態を対象として河床形状のある長さの尺度 k で代表できるものとすれば

などが認められている。これらの実験事実を考慮し, σ, ρ および g を定値とみなし, 2次元形態を対象として河床形状のある長さの尺度 k で代表できるものとすれば

などが認められている。これらの実験事実を考慮し, σ, ρ および g を定値とみなし, 2次元形態を対象として河床形状のある長さの尺度 k で代表できるものとすれば

$$f(g, R, I, d, V, k) = 0$$

の関係式が期待される。 $V_*^2 = gRI$ および $\tau_* = V_*^2/(\sigma/\rho - 1)gd$ を考慮すれば, 次元解析によって

$$f\left(F_r, \tau_*, \frac{V_m}{V_*}, \frac{R}{k}\right) = 0, \text{ or } f_2\left(I, \tau_*, \frac{V_m}{V_*}, \frac{R}{k}\right) = 0, \text{ or } f_3\left(I, \frac{R}{d}, \frac{V_m}{V_*}, \frac{R}{k}\right) = 0$$

が導かれる。流れの抵抗特性 ($V_m/V_* \sim R/k$) が河床形態に対応して異なるものと考えれば, 上式はそれぞれさきの Garde-Albertson, 杉尾および Garde-Raju の2次元河床形態の区分に対応することになる。実測資料との対応は必ずしも十分とはいきれないが, 抵抗則に関する討議においても, 指摘された流れの3次元要素などの諸問題, とくに, ripples と dunes, さらに3次元形態の alternating-bars との共存状態の解明が, これらの区分法に対する今後の課題であらう。

鮭川の区分法は、無次元量の設定にひずみ模型の概念を導入して流路の規模を考慮したものであり、3次元形態が2次元形態と明瞭に区分される点に上記の区分法に見られない特徴がある。この区分法は、3次元形態に対する無次元量の構成に示唆するところが大きいものと考えられる。

なお、上記の区分法は、いずれも均一砂粒、一定流量の実験水路における河床形態を対象としており、実際河川への適用には、さらに河床材料の特性、流量の変動などに対する問題が残されている。

(2) 河床形態の発生理論

種々の河床形態は局所的な洗掘と堆積の結果、河床面に凹凸が発生し、流水と河床の相互作用によって凹凸が発達し、平衡状態に達することによって形成されると考えられる。このような形成過程に対する河床形態の発生理論として、流水と河床の境界面の不安定性を問題とする考え方と、河床形態の発達における、乱流構造を重視する考え方がある。このことは、さきの sand waves 上の流れに関する論点の一つと指摘された。不安定性を追究する理論には、流水にポテンシャル流理論を適用する Kennedy¹⁴⁾、林¹⁵⁾などの理論と、開水路流れの基礎方程式による Reynolds¹⁶⁾、椿・斉藤¹⁷⁾、Hansen¹⁸⁾、Gradowczyk¹⁹⁾、Callander²⁰⁾らの理論がある。これらの理論では、河床面の不安定性を生ずる要因として、局所的な流速と流砂量の対応の遅れ (Kennedy, Reynolds)、河床形状と水理量との位相差 (Hansen, Callander)、流速分

布の非対称性と砂移動の非平衡性(椿・斉藤)、流砂量の非対称性(林)などが考えられている。

河床面の不安定性を論ずる理論では、一般に河床形態の波長と F_r との関係によって不安定領域すなわち発生領域が与えられ、河床形態の分類には有用であるが、実際にどのような河床形態が形成されるかを予測することはできない。たとえば、図-9 および 図-10 はそれぞれ2次元および3次元形態に関する林の理論結果であるが、同じ F_r の値に対して、いくつかの河床形態が存在し、また、両図を重ねれば2次元と3次元の河床形態が共存することになる。前項に述べた次元解析による区分法もあわせて、このような問題点を解明するためには、流れの乱れの構造との関係など河床形態の発生機構に立入って、与えられた条件のもとで、どのような波長のかく乱が発達するかを明らかにする必要があると考えられ sand waves 上の流れの内部機構の解明が待たれる。本課題に関する討論も、もっぱらこうした河床形態の共存に向けられた。

む す び

以上、第II部門研究討論会の主要な論点を述べた。本討論会は多数の会員の参加のもとに、適切な話題提供と適確に論点を指摘する活発な討論・質疑応答によって、時間的な制約にもかかわらずきわめて円滑に進められ、広範な問題点をあげ、包含する移動床水路の基礎的課題に関する研究の現状が浮きぼりにされ、ここに提示された一連の論点は、この分野における今後の研究の方向づけに資するものとして高く評価されるであろう。

参 考 文 献

- 1) 椿東一郎・古屋朝治：流砂ある河川における流速法則について、九州大学流体工学研究所報告，第7巻，4号，昭和26年
- 2) 芦田和男：河道の設計法，土木技術資料，Vol. 1, No. 7, 昭和34年
- 3) Kikkawa, H., Shi-igai, H. and Fukuoka, S.: On the effects of suspended sediment to the bed roughness, Proc. 12th Cong. IAHR, Vol. 1, 1967
- 4) Alam, A.M.Z., Cheyer, T.F. and Kennedy, J.F.: Friction factors for flow in sand bed channels, Hydrodynamic Lab., Report No. 78, Department of Civil Engineering M.I.T., June, 1966
- 5) Vanoni, V.A. and Hwang, L.: Relation between bed forms and friction in streams, Proc. ASCE, Vol. 93, No. HY 3, May 1967
- 6) Yalin, M.S.: On the average velocity of flow over a movable bed, La Houille Blanche, No. 1, 1964
- 7) 杉尾捨三郎：河川の平均流速公式と河床面形態との関連について，土木学会論文報告集，No. 171, 1969
- 8) Raudkivi, A.J.: Loose Boundary Hydraulics, Pergamon Press
- 9) 芦田・奈良井：河床形態の変動特性に関する研究，防災研年報 12 B

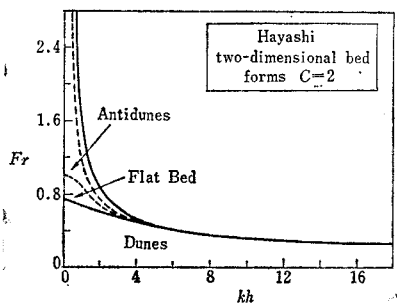


図-9 林の理論による二次元河床形態の発生領域

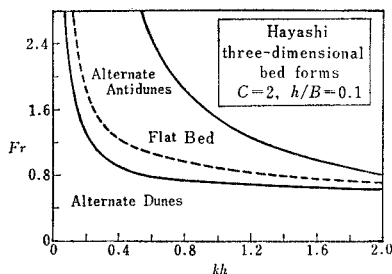


図-10 林の理論による三次元河床形態の発生領域

- 10) Garde, R.J. and Albertson, M.L. : Sand Waves and regimes of flow in alluvial channels, Proc. IAHR, Montreal, Vol. 4, 1959
- 11) 杉尾捨三郎 : 移動床をもつ流れの水路床形態の区分について, 土木学会論文集, 第71号, 1960
- 12) Garde, R.J. and Ranga Raju : Regime criteria for alluvial streams, Proc. ASCE, Vol. 89, No. HY 6, Nov. 1963
- 13) 鮎川 登 : 直線河道における砂礫堆の形成条件について, 第26回土木学会年次学術講演会講演集, 1970
- 14) Kennedy, J.F. : The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 16, Part 4, 1963
- 15) 林 泰造 : 河川蛇行の成因についての研究, 土木学会論文報告集, 第180号, 1970
- 16) Reynolds, A.J. : Waves on the erodible-bed of an open channel, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 22, Part 1, 1965
- 17) 樫東一郎・齊藤 隆 : 流れによる Sand Wave の発生限界, 九大工学集報, 第40巻, 第5号, 1967
- 18) Hansen, E. : On the formation of meanders as a stability problem, Basic Research Progress Report No. 13, 1967
- 19) Gradowczyk, M.H. : Wave propagation and boundary instability in erodible-bed channels, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 33, Part 1, 1968
- 20) Callander, R.A. : Instability and river channels, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 36, Part 3, 1969

土木学会第 26 回年次学術講演会講演集残部頒布中 (46.10.1~3 仙台)

部 門	部 門 別 内 容	題数・ページ数	頒 価
第1部	応力・構力・構造・橋梁など	239 題 720 p.	1 600 円 (〒 200 円)
第2部	水理・水文・河川・港湾・海岸・発電・衛生など	230 題 686 p.	1 500 円 (〒 200 円)
第3部	土質・基礎・岩盤など	145 題 488 p.	1 000 円 (〒 200 円)
第4部	道路・鉄道・交通・都市・国土・測量など	116 題 322 p.	700 円 (〒 200 円)
第5部	土木材料・土木施工・コンクリートなど	126 題 348 p.	800 円 (〒 200 円)

建設総合コンサルタント

業 務 内 容 <調査・測量・計画・設計・監理>

土 木 部 門

- ・鋼構造物およびコンクリート構造物
- ・空港, 鉄道および地下鉄, トンネル
- ・道路, 高速自動車道, 自動車テストコース

地 質 部 門

- ・地質および土質

水 工 部 門

- ・農業土木全般, 水源の多目的処理, 水理模型実験
- ・河川の治水, 利水計画, 電子計算機による各種水理計算, 工業用水

総合計画・区画整理部門

- ・地域開発, 都市計画, 都市再開発
- ・団地造成, 公園緑地計画, 土地区画整理
- ・上下水道, 汚水処理

建築・設備部門

- ・一般建築, 放送その他の特殊建築
- ・土木, 建築にともなう電気, 空調, その他諸設備
- ・公害対策, 防災施設その他



日本技術開発株式会社

代表取締役会長 永 山 時 雄

代表取締役社長 梶 谷 薫

本 社 東京都新宿区西大久保3の10 電話 (202) 5 1 1 1 大代表
 大阪支社 大阪市南区順慶町通3の51(麻綱ビル) 電話 (271) 4 3 7 1 代 表
 福岡事務所 福岡市薬院1の5の8(喜多村ビル) 電話 (77) 1 8 5 1
 出張所等 仙台出張所 / 名古屋出張所 / 土質水質試験所