

浮流砂量に関する実験的研究

芦田 和男・道上 正規

LABORATORY STUDY OF SUSPENDED LOAD DISCHARGE IN ALLUVIAL CHANNELS

By Kazuo ASHIDA and Masanori MICHIEU

Synopsis

In this paper, the authors investigated the suspended load and discussed its effect for a stable channel. The suspended load discharge obtained experimentally by the authors did not agree with the one calculated by Lane-Kalinske's or Einstein's formula.

This fact is probably due to the inadequacy in evaluating the effects of the bed roughness, Kármán's constant and the hiding factor of grains on the suspended load discharge. The authors discussed the above points and established a equation to estimate the suspended load discharge, which was introduced with a analytical model based on the experimental results.

By the obtained equation, the authors discussed the characteristics of stable channels with suspended load which was much different from those with bed load, which showed the good agreement with the experimental results.

1. 緒 言

わが国は地形急峻であり、降水量も多く、かつ地盤運動が盛んであって、山地崩壊や地面浸食にもとづく河川への流送土砂は一般に非常に多い。流砂の問題は治水および利水における基本的課題であり、非常に広範多岐に及ぶが、この中でとりわけ最も基本的な課題の一つは流砂量をどのように算定するかということであろう。流砂は輸送形式によって掃流砂と浮流砂に分けられるが、とくに後者についての算定は非常に困難である。ところが一般には河川的全流砂量のうちで、浮流砂量の占める割合は非常に大きく、たとえば貯水池の堆砂、浚渫箇所や河口部における堆砂などの工学的な問題にとって非常に重要であり、その解明が要望されている。

浮流砂量式を明らかにするためには、まずその基礎として、浮流砂を含む場合の流れの諸特性¹⁾、乱流構造の変化²⁾、濃度分布³⁾⁴⁾、河床付近の濃度⁵⁾などがあり、これに関する研究は従来数多く行なわれているが、なお未解明の問題を数多く残している。

一方、浮流砂量の算定に対する実際面からの要請は強く、従来提案されている Lane-Kalinske 式⁶⁾や Einstein 式⁷⁾は非常に広く使用されているようである。しかしながら、これらの浮流砂量式の適合性に関する検討は従来ほとんど行なわれていないようであって、これらの式がどの程度信頼しうるか非常に疑問である。そこで本報告はこれらの浮流砂量式に関して実験的検討を加え、工学的立場からそれらの問題点の考察を試みたものである。すなわち種々の水理条件のもとで浮流砂に関する実験を行ない、流水の乱れの場における混合砂の濃度分布特性、浮流砂量に關係する種々のパラメータの影響、浮流砂と河床砂の粒度分布特性の關係などについて考察し、この結果にもとづいて河床付近の濃度に関して仮定をもうけて、新しい浮流

砂量式を誘導し実験的な検討を行なった。

つぎに浮流砂量式の実際問題への適用例として、幅が変化する水路における安定河床形状および粒度分布に及ぼす浮流砂の影響について考察を加えた。安定河床の問題は従来主として掃流砂のみの場合を対象として取りあつかわれているようである⁹⁾が、浮流砂を考慮するとその特性が大いに変化するはずである。とくに幅の変化に応じて粒度分布特性が顕著に変化してくるというような現象は浮流砂を考慮しないと説明することは困難であろう。そこで著者らは、まず幅が変化する水路において、水理特性、河床形状および粒度分布特性がどのように変化するのかについて実験的に考察⁹⁾し、さらに新たに提案する浮流砂量式にもとづいて、上記の諸量の変化の考察を行なった。

2. 浮流砂量に関する実験

流砂現象は流水の水理特性、砂れき特性および河床形状などによって規定されと考えられるが、これに関与する因子の数が多いこととその力学機構の複雑さのために、全貌を把握することは非常に困難である。しかしながら工学上の問題から浮流砂量の算定が要望されているので、Lane-Kalinske および Einstein の浮流砂量式の適合性の検討を実験的に試みるとともに、さらに新しい浮流砂量式を提案することを目的とした。なおこの実験は中央粒径がそれぞれことなる混合砂を用い、河床形状が Lower Regime および Upper Regime に属するものである。

(1) 実験装置および実験方法

a) 実験装置

実験水路Ⅰは水路幅 40 cm、長さ 50 m の長方形のモルタル仕上げの水路であり、実験水路Ⅱは水路幅 20 cm、長さ 13 m の長方形断面の鋼製水路である。上流部に設置した堰の越流水深を測定することによって流量を測定した。河床は10数 cm の厚さに砂を一様に敷きならし、河床砂と同一の砂を上流端のスクリーン方式の給砂器によって補給し、実験期間中河床こう配が変化しないように考慮した。実験に使用した砂は Fig. 1 に示している。

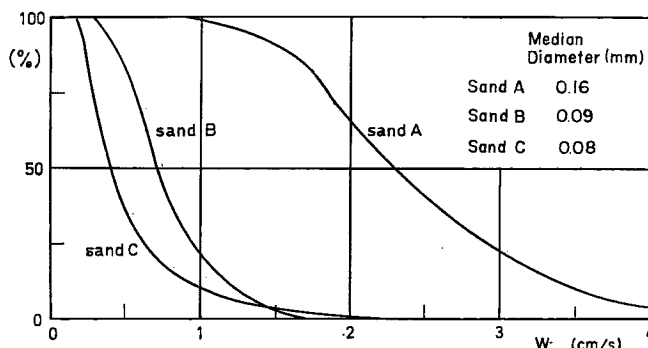


Fig. 1 Size frequency distributions of used sands

Sand A : 20°C in water temperature

Sand B : 20°C in water temperature

Sand C : 8°C in water temperature

なお、Sand D は平均粒径が 1.77 mm の粗い砂である。2 mm×30 mm の長方形断面の真ちゅう製のパイプに、内径 8 mm のビニールパイプをつないで、浮流砂をサイフォン方式によって採集した。この方式による浮流砂の採集に際して、採水位置での流水の速度と採水速度ができるだけ一致するように努めた。浮流砂のように流体中での砂の挙動を取り扱う場合には、砂の沈降速度が非常に重要な意義を持つと考えられるので、この実験においては砂の粒度分析を V-A・Tube を使用して沈降分析によって行なった。流速

の測定は最大測定範囲が 20gr/cm^2 の差圧計を用いて行なった。

h) 実験方法

Run 1~12 は Table 1 に示す条件で実験を行なった。水位は水路中央部に沿って、Run 1~4 では縦断

Table 1 Conditions of experiments

Run No.	Discharge l/s	Channel width cm	Supplied sediment dis. gr/s	Supplied material	Bed material
1	10	40	32.3	Sand A	Sand A
2	18	40	60	Sand A	Sand A
3	10	40	50	Sand B	Sand B
4	10	40	77.5	Sand A 50% Sand B 50%	Sand A 50% Sand B 50%
6	2	20	10	Sand C	Sand C
7	2	20	4.9	Sand A	Sand A
9	3.5	20	12	Sand A	Sand A
10	2.5	20	4	Sand A	Sand A 45% Sand D 55%
11	2.5	20	10.5	Sand A	Sand A 80% Sand D 20%
12	2.5	20	6.7	Sand A	Sand A 63% Sand D 37%
5	10	40 : Up stream 80 : Down stream	33.3	Sand A 50% Sand B 50%	Sand A 50% Sand B 50%

方向に 2 m 間隔, Run 6~12 では 0.5 m 間隔にポイントゲージを用いて測定した。縦断方向には水位と同じ間隔に, 横断方向には各実験とも 3 点測定し, それらを平均して平均河床高とすることにした。濃度分布を Run 1~4 では station 10, 20, 30, 40 (この表示は下流端からそれぞれ 10m, 20m, 30m, 40m の距離の断面を表わしている。以下すべてこの表示を用いることにする), Run 6~12 では station 4 のそれぞれ水路中央部で測定した。濃度分布の測定は通水前にあらかじめ河床に最も接近した所定の位置に浮流砂採集装置を設置し, 通水後水位の変化がなくなってから, この位置から水面に向かって順次採集装置を上げて, 所定の高さの浮流砂を採集して行なった。河床付近の浮流砂を採集する場合, 河床砂を吸いこまないように注意しながら河床付近の濃度を測定した。

(2) 実験結果とその考察

Table 1 の条件下で行なった各実験結果の主な水理量は Table 2 に示すとおりである。Run 1, 2 の Manning の粗度係数が非常に小さくなっているのは河床形状が Upper Regime に属し, Flat Bed もしくは Standing Wave であることによる。一方 Run 3~6, 11, 12 の n が大きくなっているのは河床形状が Lower Regime に属し, Dune が発達していたことによる。Dune の高さは 1~2.5 cm, その移動速度は約 1cm/min であった。また Run 10 は河床に移動しない砂を約 50% 敷いていたので, Dune の発生が見られず, その粗度係数も小さい。

a) 粒径別濃度分布

濃度が定常でしかも鉛直方向のみの関数で表わされる場合の濃度分布に関する基礎式は次式のように表わされる。

$$\varepsilon_s \frac{dC}{dz} + w_0 C = 0 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

Table 2 Summary of experimental results

Run No.	Depth cm	Slope	Shear Velocity cm/s	Mean Velocity cm/s	Manning's Coeff.	Froude No.	Water temp. °C
1	4.20	0.00405	4.08	62.6	0.0114	1.07	20
2	7.05	0.00234	4.02	63.8	0.0106	0.90	20
3	8.11	0.00263	4.58	30.9	0.0249	0.41	16
4	8.21	0.00269	4.66	30.5	0.0255	0.41	18
6	5.28	0.00358	4.30	17.7	0.0377	0.29	8
7	4.71	0.00500	4.80	21.2	0.0335	0.38	5
9	6.50	0.00588	6.12	26.9	0.0305	0.43	5
10	3.77	0.00340	3.55	33.2	0.0177	0.64	7
11	4.00	0.00541	4.60	31.3	0.0221	0.58	7
12	4.00	0.00451	4.20	31.3	0.0205	0.58	7
5	Up stream	7.6	0.00340	5.04	0.0257	0.45	8
	Down stream	5.2	0.00455	4.80	0.0359	0.36	8

いま基準濃度 C_a を用い、 ε_s を一定として (2.1) 式を積分すれば、

$$\frac{C}{C_a} = \exp \left\{ -\frac{hw_0}{\varepsilon_s} \left(\frac{z-a}{h} \right) \right\} \dots\dots\dots (2.2)$$

となる。ここに ε_s ; 土砂拡散係数、 C ; 濃度、 C_a ; 河床面から a の高さの濃度、 z ; 河床面からの高さ、 h ; 水深、 w_0 ; 沈降速度を表わす。つぎに ε_s が流水の運動量拡散係数に等しいとすれば、すなわち

$$\varepsilon_s = \kappa u_* z \left\{ 1 - \frac{z}{h} \right\} \dots\dots\dots (2.3)$$

とすれば、(2.1) 式は次式のように書ける。

$$\frac{C}{C_a} = \left\{ \frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a} \right\}^Z \dots\dots\dots (2.4)$$

ここに、 κ ; カルマン定数、 $Z = w_0 / \kappa u_*$ である。(2.2) 式および (2.4) 式は一樣砂の場合の濃度分布式であるが、混合砂の場合にもこれらの関係が成立するかどうか、また開水路移動床流れにおける濃度分布は (2.2) 式あるいは (2.4) 式のどちらによって表わされるかを検討することにしよう。

片対数紙上に $\ln C$ と z をとって濃度をプロットして直線が得られるようであれば、濃度分布は (2.2) 式で示されることになる。また同様に両対数紙上で、 C と z の関係が直線性を示せば、濃度分布は (2.4) 式によって表わされることになる。これらの関係を検討するために **Figs. 2, 3** に実験結果の数例を示している。**Fig. 2** は河床形状が Flat Bed の場合で、**Fig. 3** は河床に Dune が発達した場合のものである。なお図中の沈降速度は浮流砂の沈降速度分布を 0.2cm/s 間隔に分割し、その両端の沈降速度の平均値で示したものである。その際の浮流砂の粒度分割は河床砂を基準にして行なった。実験値のばらつきはあるが、これらの図より河床形状が Flat Bed の場合には両対数紙上で整理した実験値の方が片対数紙上のそれよりも比較的直線性が成立するようである。したがって河床形状が Flat Bed の場合の濃度分布は (2.4) 式で表現する方がよいようである。つぎに河床に Dune が発達し、河床形状が不規則な形をしている場合には、点が非常にばらついていたり、河床からある高さまでは一定で、その点から鉛直方向に減少しているものなどがあり、濃度分布は一定の傾向を示さない。これは河床の不規則性によって誘起される濃度変動、採砂中に基準とする河床高が変化することおよび土砂拡散係数の場所的变化などによるものであろう。したがって濃度分布形に関しては Flat Bed の場合に限って述べることにする。**Fig. 4** は **Fig. 2 (a)** の濃度分布から求めたこう配 Z と沈降速度 w_0 の関係を示したものである。

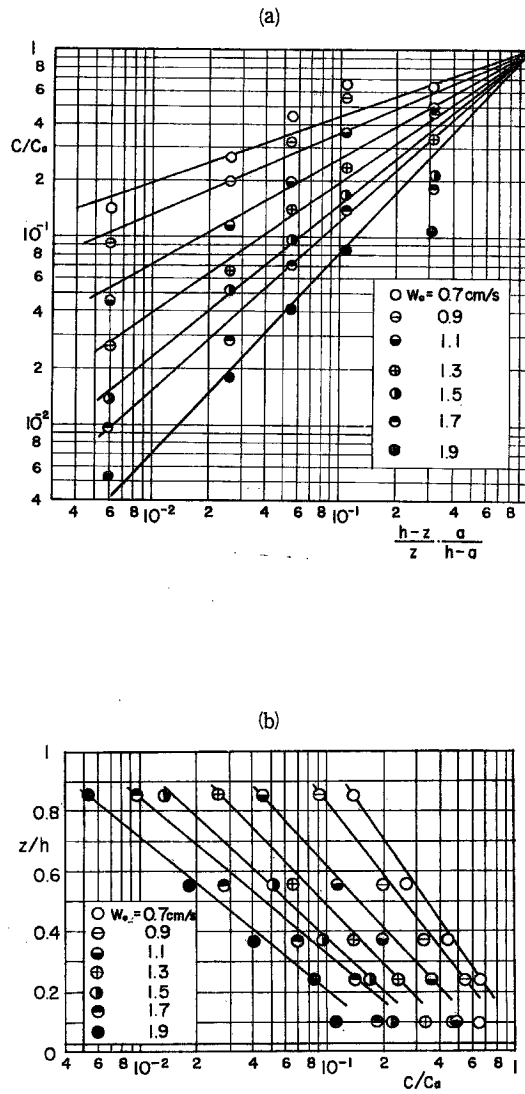


Fig. 2 Concentration distributions of sediment in a vertical above flat bed (Run 2)

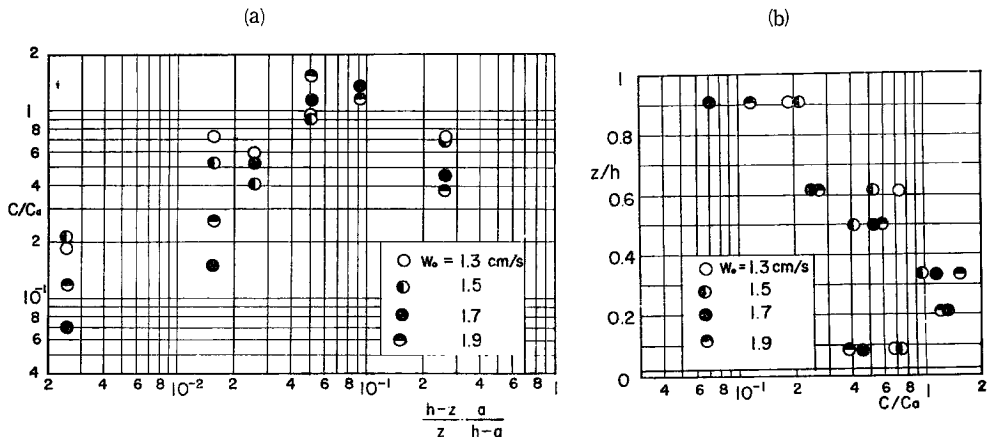
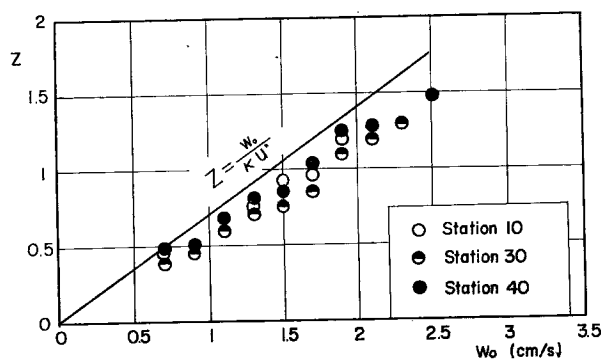


Fig. 3 Concentration distributions of sediment in a vertical above dune bed

Fig. 4 Relation between Z and w_0

この図から明らかなように実験結果の Z と w_0 は直線関係である。なお図中の直線はカルマン定数を志村の式¹⁷⁾で計算した値を用いている。実験値の方が直線よりも若干小さいようであるが、カルマン定数および濃度のばらつきを考慮に入れると実験値は図中の $Z = w_0 / \kappa U^*$ であらわされると考えてよいであろう。しかしながらこの関係は粒径が小さい範囲の砂粒に対して成立すると考えられるが、粒径の大きい砂粒では土砂拡散係数が水のそれとは相違するであろうからこのような関係は多分成立しないと思われる。この実験においては河床砂の約60%の砂粒に対して上記の関係が成立している。またわが国の実際の河川の測定結果の1例によれば、浮流砂に含まれる砂粒は非常に小さく、河床材料の中にそれが占める割合は数%に過ぎないので、 Z と w_0 の関係はほぼ直線であると見なすことができよう。以上の結果から開水路流れの浮流砂の粒径別濃度分布は(2.4)式で表わされ、かつそれらの重ね合せも本実験の範囲においては成立するようである。

b) 粒度分布

浮流砂の鉛直方向の粒度分布と河床砂のそれを表わしたものが Fig. 5 である。乱れの強さが同じ程度であれば、河床砂の沈降速度が大きい場合には、浮流砂は河床面からの高さに応じて順次ふるい分けられ、河床砂の沈降速度が小さい場合には、河床面からの高さによる浮流砂の粒度分布の相違はほとんど見られない。また z/h が非常に小さい所では浮流砂の粒度分布は河床砂のそれにほぼ等しくなっている。河床砂の

移動限界流速以上の流れにおいては、河床から粒径の数倍程度の高さの粒度分布は河床砂のそれと一致して、掃流砂と河床砂の粒度分布が等しくなることを示唆している。

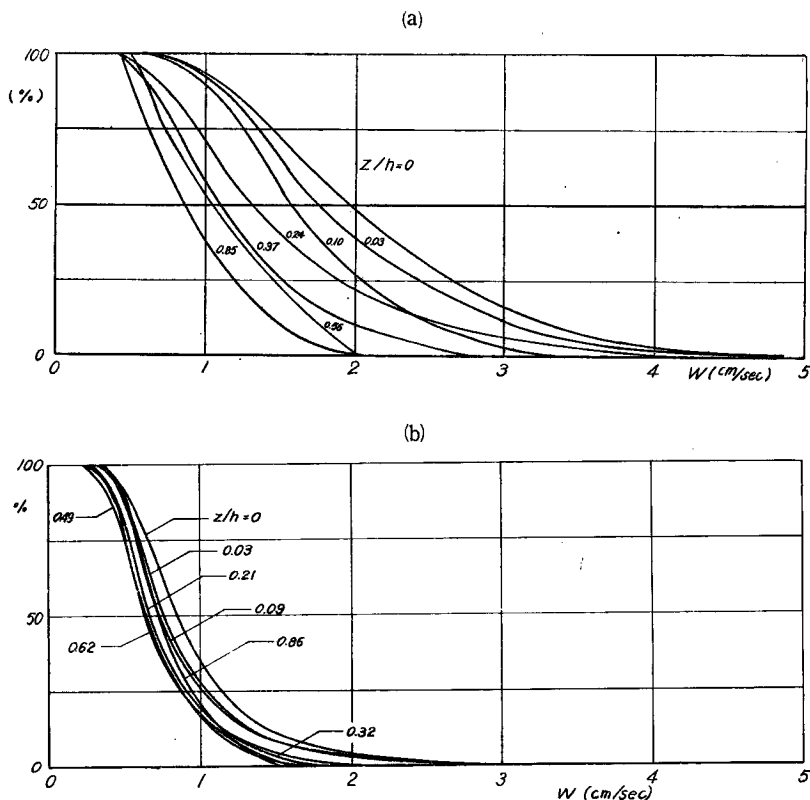


Fig. 5 Variations of size frequency distributions of suspended load for various kinds of z/h

c) 河床付近の濃度

乱流場においては河床上の砂粒子は、水の乱れと河床の相互作用によって、ごくわずかに河床面から浮き上り、流体の抗力により輸送されと考えられる。したがって河床付近の濃度を決定するのは、河床付近の乱流の内部機構と砂粒子に作用する因子の力学機構が明らかにされなければならない。しかし著者らは実用的立場から、Einstein の考え方に立脚し、河床付近の濃度について考察を試みるつもりである。b) 粒度分布の項で述べたことから明かなように、浮流砂の領域と掃流砂のそれは河床面近傍で接続していると考えられるので、浮流砂の河床付近の濃度を掃流砂のそれによって表わすことが可能であろう。河床付近の濃度は掃流砂層の厚さが薄く、そこで濃度が一定であるとすれば、次式のように表わされる。

$$C_R = \frac{q_R}{\bar{u} \cdot \Delta z} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

ここに、 C_R ；河床付近の濃度、 q_R ；単位幅単位時間当りの掃流砂量、 $\bar{u}$ ；掃流砂層での砂粒子の平均移動速度、 Δz ；掃流砂層の厚さである。さらに掃流砂層での砂粒子の平均移動速度およびその厚さがそれぞれ摩擦速度および粒径に比例するとして、 $\bar{u} = b u_{*}$ 、 $\Delta z = a_1 d_m$ とすれば、

$$C_R = \frac{q_R}{a_1 b u_{*} d_m} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

の関係が得られる。掃流砂量式は種々あるが、ここでは土研公式¹⁰⁾を用いることにすれば、(2.6)式は次式のように書ける。

$$C_R = a \cdot F(\tau_0/\tau_c) \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd_m} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

ここに、 a ； $\varphi(n)/a_1b$ ， $F(\tau_0/\tau_c)$ ；掃流力と限界掃流力との関数， σ ， ρ ；それぞれ砂および水の密度， d_m ；掃流砂の平均粒径， g ；重力加速度である。(2.7)式中の a は定数ではなく、河床粗度の関数で与えられるはずである。この a の関数形を決定するには、河床付近の流速分布、掃流砂層の厚さの検討と多くの実験が必要であろう。

d) 浮流砂量式の検討

Lane-Kalinske の浮流砂量式は次式で与えられる。

$$q_s = qC_R P \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

ここに、 q_s ， q ；それぞれ単位幅、単位時間当りの浮流砂量および流量、

$$C_R = 5.55 \Delta F(w_0) \left\{ \frac{1}{2} \frac{u_*}{w_0} \exp\left(-\frac{w_0}{u_*}\right)^2 \right\}^{1.61} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

$$P = f_1\left(\frac{w_0}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{\frac{1}{6}}}\right) \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

である。なお $\Delta F(w_0)$ は沈降速度 w_0 なる土砂粒子の河床物質中に占める割合（%単位）を示す。(2.8)式を変形すると、

$$\frac{q_s}{q \Delta F(w_0)} = f_2\left(\frac{w_0}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{\frac{1}{6}}}\right) \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

のようになり、この表示を用いて Lane-Kalinske 式と本実験値を比較したものが Fig. 6 である。浮流砂量は実験値の方がすべて Lane-Kalinske 式よりもはるかに大きくなっている。(2.11)式は実際河川の資料をもとにして作られた半経験公式であり、その資料の水理量も明らかでないので、実験値との相違に関する詳細な議論はなし得ないが、実験結果を通じてこの相違の原因について若干考察し、浮流砂量式に対する検討を加えることにしよう。

こうした種類の実験では、測定に誤差を伴いやすく、また現象の再現性も必ずしもよくないので、まず実験値がどの程度の精度を持っているか検討した結果、浮流砂量は時間的、場所的に変化しており、 $q_s/q \Delta F(w_0)$ の変化は約2倍であった。しかし Fig. 6 に示した実験値と Lane-Kalinske 式との相違はこういった測定上の誤差では説明できない。

Run 1, 2, 10 の浮流砂量をプロットした点のこう配と他のケースのそれとは相違している。すなわち前者は後者よりも急になっている。Run 1, 2, 10 の Manning の粗度係数 n は他のケースに比較して約 $\frac{1}{2}$ である。これは最初に述べたように、Run 1, 2, 10 の河床形状が Flat Bed であるのに対し、他のケースの河床形状が Dune の発生によって不規則になっていたことによる。Dune が発生し、発達した場合にはその形状抵抗のために、砂粒を移動させるに有効に働くせん断応力は全せん断応力に比較して小さくなり、流砂量は減少すると考えられる。したがって Run 1, 2, 10 と他のケースの浮流砂量の相違はこうした効果によるものと考えられるであろう。実験値と Lane-Kalinske 式との相違に対してもこの効果はかなり影響しているものと思われる。Lane-Kalinske 式には粗度の効果を表わすパラメーター $n\sqrt{g}/h^{1/6}$ が入っているが、これは浮流砂量を求めるにあたって流速分布形の違いを補正する程度のものであって、その影響はそれほど大きくない。

つぎに Lane-Kalinske 式がカルマン定数の変化によってどのように変化するかを調べることにする。流速分布として対数法則を変形して、

$$\frac{u}{u_m} = 1 + \frac{1}{\kappa} \frac{u_*}{u_m} + \frac{1}{\kappa} \frac{u_*}{u_m} \ln \frac{z}{h} \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

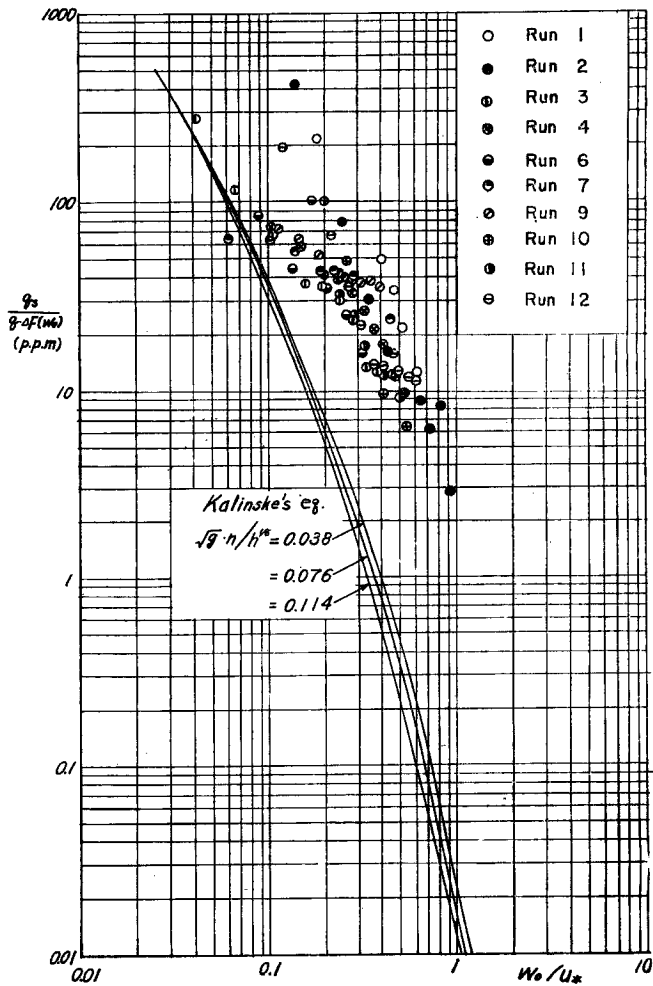


Fig. 6 Comparison between experimental values and Lane-Kalinske's equation

を用い, Manning 型の抵抗法則

$$\frac{u_*}{u_m} = \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}} \dots\dots\dots (2.13)$$

を用い, さらに濃度分布式として (2.2) 式を用いると浮流砂量は次式のように表わされる。

$$q_s = C_a q_e \frac{aw_0}{\varepsilon_s} \int_a^1 \left(1 + \frac{1}{\kappa} \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}} + \frac{1}{\kappa} \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}} \ln \eta \right) e^{-\frac{hw_0}{\varepsilon_s} \eta} d\eta \dots\dots\dots (2.14)$$

土砂拡散係数 ε_s として水の運動量拡散係数の平均値 $\kappa u_* h/6$ を用いると (2.14) 式は次式のように変形される。

$$q_s = C_a q_e \frac{6aw_0}{h\kappa u_*} \int_a^1 \left(1 + \frac{1}{\kappa} \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}} + \frac{1}{\kappa} \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}} \ln \eta \right) e^{-\frac{6w_0}{\kappa u_*} \eta} d\eta \dots\dots\dots (2.15)$$

いま, $a \ll h$ とし, (2.15) 式の積分の部分に P_1 とすれば, 上式はつぎのように書ける。

$$q_s = C_a \cdot q P_1 \dots\dots\dots (2.16)$$

(2.16) は C_a として (2.9) 式を用い, かつ P_1 を求める際に $\kappa = 0.4$ とすれば Lane Kalinske 式になる。 κ の変化によって P_1 がどのように変化するかをみるために, $n\sqrt{g}/h^{1/6}$ をパラメータにして計算したものが Fig. 7 である。この図から $n\sqrt{g}/h^{1/6}$ が大きくなれば, P_1 の値は κ の減少によって非常に減少することがわかる。したがって浮流砂量は w_0/u_* が一定であれば, κ の減少によって減少し, とくに $n\sqrt{g}/h^{1/6}$ が大きい場合には, κ のわずかの減少によっても, 非常に減少することがわかる。本実験における $n\sqrt{g}/h^{1/6}$, κ の値が Table 3 に示されているが, κ の値は 0.35~0.4 の範囲である。しかしながら実際河川では Wash Load の影響のため κ が減少し, 浮流砂を輸送する能力が減少して, 浮流砂量が実験値のそれよりも小さくなることが予想される。

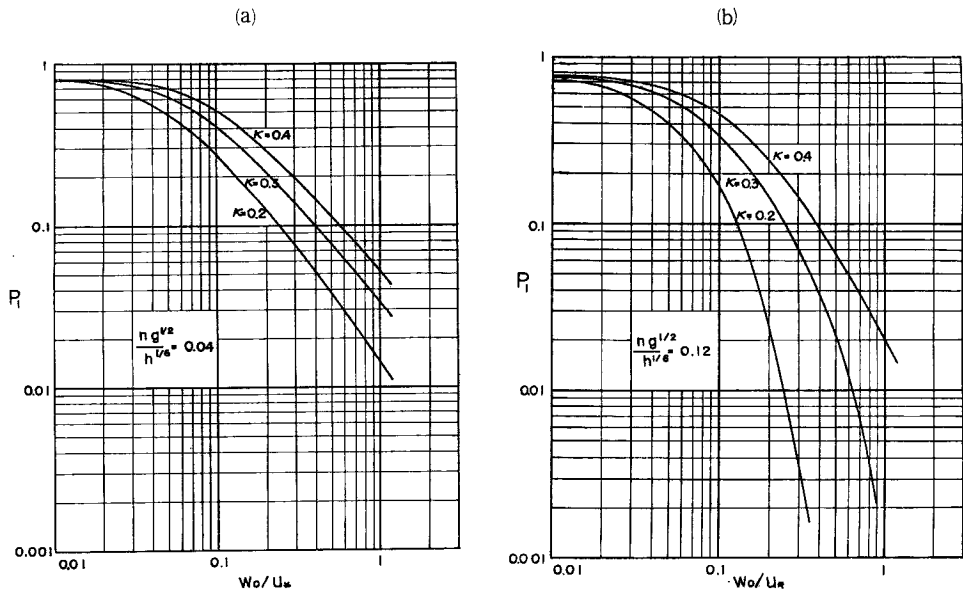


Fig. 7 Relation between P_1 and w_0/u_* for various kinds of Parameters, κ and $n\sqrt{g}/h^{1/6}$

以上の考察により, 粗度の効果を表わすパラメーターを a とすれば, Lane-Kalinske の浮流砂量式は

$$\frac{q_s}{q_d F(w_0)} = f_3\left(\frac{w_0}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}, a, \kappa\right) \dots\dots\dots (2.17)$$

の形にすべきであると考えられる。

つぎに広く用いられているもう一方の浮流砂量式の Einstein 式による計算値と実験値を比較したものが Table 4 である。

計算値と実験値はとくに沈降速度の小さい砂粒子に対して相違が大きい。この実験の場合のように粒径が小さい場合には, 粒子が粘性底層によって遮蔽される効果または粗い粒子による細かい粒子が遮蔽される効果を表わす遮蔽係数の値が粒径の小さい範囲においてとくに大きくなり, 掃流砂の中で細かい砂粒子の割合が河床砂のそれに比較してかなり小さくなる。ところが (b) 粒度分布の項で述べたように, 実験では掃流砂の粒度分布は河床砂のそれとほとんど等しい。このことは Einstein の掃流砂量式で遮蔽効果を表わす遮蔽係数が過大に評価されていることを示している。河床砂の中で移動している砂粒と静止している砂粒が混在

Table 3 Values of $\frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}$, κ and $\frac{d_m}{h}$

Run No.	$\frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}$	$\frac{d_m}{h}$	κ
1	0.061	0.0037	0.37
2	0.052	0.0022	0.35
3	0.119	0.0012	0.37
4	0.121	0.0014	0.37
6	0.193	0.0018	0.38
7	0.185	0.0029	0.35
9	0.150	0.0024	0.37
10	0.100	0.0164	0.38
11	0.120	0.0039	0.37
12	0.118	0.0050	0.37

Table 4 Comparison between experimental values and Calculated values by Einstein's eq.

Run 1			
Range of grain cm/s	Ratio of bed sand %	Suspended load discharge gr/cm·s	
		Experimental values	Calculated values
$3.2 < w_0$	8.5		
$2.8 < w_0 < 3.2$	9.0		0.032
$2.4 < w_0 < 2.8$	15.5		0.032
$2.0 < w_0 < 2.4$	20.0	0.054	0.029
$1.6 < w_0 < 2.0$	24.0	0.095	0.036
$1.2 < w_0 < 1.6$	16.5	0.128	0.027
$0.8 < w_0 < 1.2$	6.0	0.147	0.014
$0.4 < w_0 < 0.8$	0.5	0.070	
Run 2			
Range of grain cm/s	Ratio of bed sand %	Suspended load discharge gr/cm·s	
		Experimental values	Calculated values
$3.2 < w_0$	4.5	0.015	
$2.8 < w_0 < 3.2$	7.0	0.018	0.018
$2.4 < w_0 < 2.8$	12.0	0.050	0.023
$2.0 < w_0 < 2.4$	20.5	0.090	0.027
$1.6 < w_0 < 2.0$	26.0	0.188	0.033
$1.2 < w_0 < 1.6$	20.5	0.283	0.031
$0.8 < w_0 < 1.2$	8.5	0.295	0.033
$0.4 < w_0 < 0.8$	1.0	0.194	

している場合には、遮蔽効果は小さい砂粒に対してかなり大きいと考えられるが、掃流力が限界掃流力に比較してかなり大きく、河床の全砂粒が移動している状態では、遮蔽効果は Einstein 式で求めるよりも小さくなっていると考えられる。Table 4 に Run 1, 2 以外の計算値を示していないのは遮蔽係数が非常に大きくなって式の適用範囲を越したためである。遮蔽効果を検討するために Run 10~12 の実験を行なった。これらの実験においては、河床にほとんど移動しない粗い砂と細かい砂を混合させて、その効果について検討したが、その効果は実験結果からは明らかにされなかった。以上述べてきたように、従来提案されている浮流砂量式については底面粗度の影響、カルマン定数の変化、遮蔽効果に関して再検討を必要とする。

さて、濃度分布式として (2.4) 式、基準濃度 C_a として (2.6) 式、流速分布および抵抗法則としてそれぞれ (2.12) および (2.13) 式を用いることにすれば、浮流砂量を表わす関数形は次式のようになる。

$$\frac{i_s q_s}{i_B q_B} = f\left(\frac{w_0}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}, \kappa, \frac{d_m}{h}\right) \dots \dots \dots (2.18)$$

ここに、 i_s , i_B ; それぞれ与えられた粒径または粒径範囲の土砂が浮流砂および掃流砂において占める割合である。 q_B として底面粗度を考慮に入れた土研公式を使用し、 i_B として河床砂の粒度を用いて、実験値を整理したものが Fig. 8 である。Fig. 6 と Fig. 8 を比較すると後者の方が実験値のばらつきが少なくなっていることがわかる。また w_0/u_* がもっとも支配的でこの実験範囲で $n\sqrt{g}/h^{1/6}$, κ , d_m/h による変化はあまり見られず、浮流砂量はつぎの関係で示されよう。

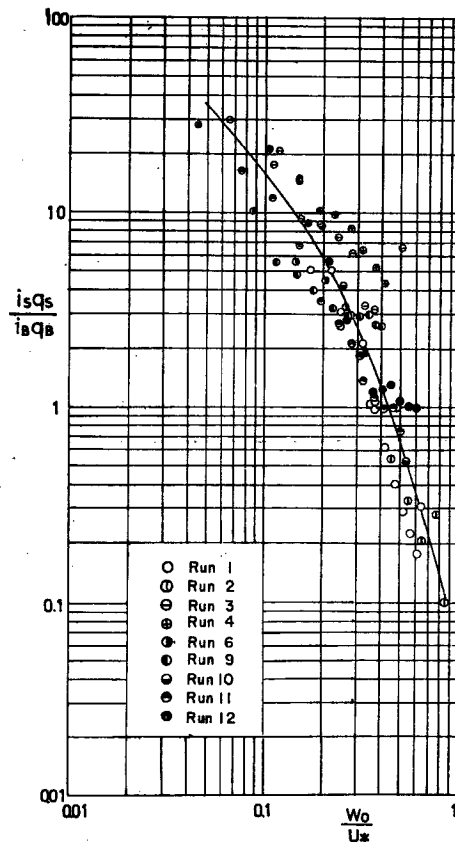


Fig. 8 Relationship between $i_s q_s / i_B q_B$ and w_0 / u_*

$$\frac{i_s q_s}{i_B q_B} = f_4 \left(\frac{w_0}{u_*} \right) \dots \dots \dots (2.19)$$

ここに、 $f_4(w_0/u_*)$ ；Fig. 8 に示す実験曲線である。

3. 平衡河床形状に及ぼす浮流砂の影響について

平衡河床は河床変動の特殊な形態であって、上流側から入ってくる流砂量と下流側から出ていく流砂量が均衡して、そこに洗掘も堆積も生じない場合である。このような平衡状態の河床形状に関しては、掃流砂のみを取り扱った研究が多く研究者によってなされ、その機構も明らかにされてきている。しかし実際河川においては、河道の底質、流域の特性によって相違するが、一般に流量が増加すれば浮流砂は掃流砂よりも支配的になり、これによって誘起される河床変動も掃流砂のみを対象とした場合とはことなつた様相を呈すると考えられる。したがって著者らは浮流砂を伴う場合の河床変動を解明する第1段階として、浮流砂を伴う流れにおける平衡河床形について考察しようとするものである。

(1) 実験装置および実験方法

実験に用いた水路は下流区間 30m で 80cm、上流区間 20m で 40cm の断面の変化するものである。給砂および河床に敷いた砂は Sand A と Sand B を 1:1 の割合で混合したものである。ここではとくに、水位および河床砂の粒度分布の場所的、時間的变化について詳細に観察を行なった。下流端での全流砂量を測定し、上流端の給砂量に等しくなるまで実験を継続した。なお実験条件は Table 1 に示している。

(2) 実験結果

河床状態は上流区間、下流区間ともに Dune が発達し不規則であったので、Manning の粗度係数は Table 2 に示すように非常に大きくなっていった。水面こう配は通水初期においては、固定床の場合と同じ傾向を示しているが、時間が経過するにつれて station 30 (下流端から 30m の距離の位置) を境にして、下流区間の水面こう配が上流区間のそれよりも急になっている。

この水面こう配の時間的变化を示したものが Fig. 9 である。上流区間の水面こう配はとくに時間の初期において減少し、下流区間のそれは増加し、それぞれ時間の経過につれて一定の状態に移行している。通水後 8 時間では、上下流の水面こう配が一定の状態に達しているの、ほぼ平衡状態に達しているものと思われる。掃流砂のみの場合の平衡状態においては水面こう配は幅の変化にかかわらずほとんど変化しないことが知られているが、浮流砂を伴う流れではその特性が著しく相違することがわかる。下流端で採集した全流砂量は通水後 4 時間において 23gr/s で、8 時間において 33gr/s で、上流端の給砂量

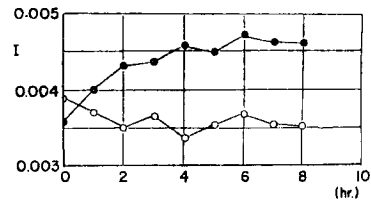


Fig. 9 Variation of slope
○； Up-stream reach
●； Down-stream reach

33.3 gr/s にはほぼ等しくなっている。したがって通水後 8 時間においては、水面こう配が上流区間、下流区間とも一定していることおよび下流端での全流砂量が給砂量に等しいことから、ほぼ平衡状態に達しているように思われる。しかしながら一方、下流端で採砂した粒度分布を Fig. 12 に示しているように、給砂したものよりもそれが小さくなっていることから、見かけ上は平衡状態に達しているが、まだこの水路の中では粒度の交換が進行しており、完全な平衡状態には達していないと考えられ、またそのような状態になるには非常に長時間を必要とするであろう。

つぎに通水後 8 時間における河床砂の粒度分布を示したものが Fig. 10 である。上流区間と下流区間とでは顕著な相違が見られ、上流区間の河床砂は下流区間のそれよりも粗くなっている。これらの粒度分布の特性を見るために、50% の沈降速度 w_{50} の時間的場所的变化を示したものが Fig. 11 である。上流区間では河床砂の粒度分布はほぼ一定であるが、下流区間においてはそれが station 30 から順次下流区間の平衡状態の粒度分布に近づいていることがわかる。これは上流区間の粗い砂が掃流形式で輸送され、下流区間の細

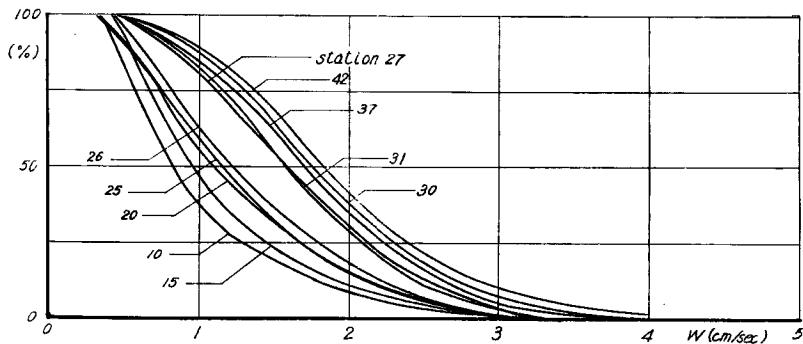


Fig. 10 Size frequency distributions of bed sand
Station 15—27 : Up stream reach
Station 30—42 : Down-stream reach

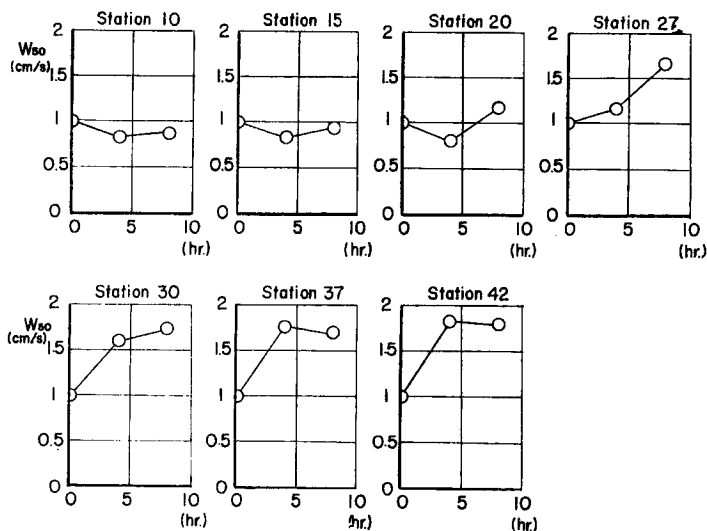


Fig. 11 Variations of W_{50}

かい砂と交換しながら下流区間の河床砂の粒度分布を変化させているものと考えられる。

(3) 理論的考察

実験結果からもわかるように粒度構成の時間的変化がなくなるまでには非常に長時間を要し、実際にはこういった変化の過程が重要であるが、ここでは河床高も粒度構成も変化しない極限の平衡状態を想定して、このような河床形状に浮流砂がどのような影響を及ぼすかについて考察する。

浮流砂量式として (2.18) 式の関数形を用いかつ $i_B = i_b$ とすれば、浮流砂量式は次式のように表わされる。

$$i_s q_s = i_b \varphi(n) \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)g} F\left(\frac{\tau_0}{\tau_c}\right) f\left(\frac{w_0}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}, \kappa, \frac{d_m}{h}\right) \dots (3.1)$$

ここに、 i_b は与えられた粒径範囲の土砂が河床において占める割合である。平衡状態においては、各粒径範囲ごとに流砂の連続性が成立しなければならない。したがって粒度分割を m 個とすれば、平衡状態にお

いてはつぎの関係が成立する。

$$\sum_{r=1}^m i_{br} = 1 \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

$$i_r Q_T = B i_{br} \varphi(n) \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)g} F\left(\frac{\tau_0}{\tau_c}\right) \left\{ f\left(\frac{w_{0r}}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}, \kappa, \frac{d_m}{h}\right) + 1 \right\} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$$Q = \frac{B h^{5/2} I^{1/2}}{n} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここに、 i_r , i_{br} ；それぞれ粒度分割 r 番目の土砂の全流砂および河床砂において占める割合、 Q , Q_T ；それぞれ単位時間当りの流量および流砂量、 B ；水路幅、 I ；水面こう配である。(3.2)～(3.4) 式を連立に解いて平衡等流水深、平衡等流水面こう配および摩擦速度を求めると次式のようになる。

$$h = Q^{3/7} \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) Q_T \right\}^{-2/7} g^{1/2} B^{-4/7} n^{6/7} \varphi(n)^{2/7} F\left(\frac{\tau_0}{\tau_c}\right)^{2/7} \\ \times \left\{ \sum_{r=1}^m \frac{i_r}{f\left(\frac{w_{0r}}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}, \kappa, \frac{d_m}{h}\right) + 1} \right\}^{-2/7} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

$$I = Q^{-6/7} \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) Q_T \right\}^{20/21} g^{-20/21} B^{-2/21} n^{-6/7} \varphi(n)^{-20/21} F\left(\frac{\tau_0}{\tau_c}\right)^{-20/21} \\ \times \left\{ \sum_{r=1}^m \frac{i_r}{f\left(\frac{w_{0r}}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}, \kappa, \frac{d_m}{h}\right) + 1} \right\}^{20/21} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$$u_* = \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g Q_T \right\}^{1/2} B^{-1/2} \varphi(n)^{-1/3} F\left(\frac{\tau_0}{\tau_c}\right)^{-1/3} \\ \times \left\{ \sum_{r=1}^m \frac{i_r}{f\left(\frac{w_{0r}}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}, \kappa, \frac{d_m}{h}\right) + 1} \right\}^{1/3} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

以上の諸式によって幅の変化に応じて h , I および u_* がどのように変化するかを知ることができる。浮流砂が存在しない流れでは $f\left(\frac{w_{0r}}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}, \kappa, \frac{d_m}{h}\right) = 0$ となるので、 B 以外のものが一定であるとすれば、平衡等流水面こう配の変化は $B^{-2/21}$ に比例し、非常に小さいが、浮流砂を伴う流れではその変化は

$B^{-2/21} \left\{ \frac{i_r}{f\left(\frac{w_{0r}}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}, \kappa, \frac{d_m}{h}\right) + 1} \right\}^{20/21}$ に比例し、 $f\left(\frac{w_{0r}}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}, \kappa, \frac{d_m}{h}\right)$ の関数が u_* のわずかの

変化によってかなり変化するので、平衡等流水面こう配の変化は水路幅だけでなく、浮流砂量によっても変化し非常に複雑になる。また水路幅の変化に応じた河床砂の粒度構成は (3.7) 式に代入して変形すると次式によって表わされる。

$$i_{br} = \frac{i_{0r} / \left\{ f\left(\frac{w_{0r}}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}, \kappa, \frac{d_m}{h}\right) + 1 \right\}}{\sum_{r=1}^m i_{0r} / \left\{ f\left(\frac{w_{0r}}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}, \kappa, \frac{d_m}{h}\right) + 1 \right\}} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

$f\left(\frac{w_{0r}}{u_*}, \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}}, \kappa, \frac{d_m}{h}\right)$ の関数形が決定されれば、(3.7) 式でまっつ速度を求め、それを (3.8) 式に適用すれば河床砂の粒度分布を知ることができる。Fig. 8 の実験曲線と Table 2 の水理量を用いて水路幅が変化する河床砂の粒度分布を (3.8) 式によって計算した結果と実験結果を比較したものが Fig. 12 である。計算結果と実験結果の分布形は若干相違しているが、上流端から給砂された砂が水路幅の変化に応じてふり分けられる過程がかなりよく説明されている。将来浮流砂を伴う流れの平衡状態における水深、水面こう配および河床砂の粒度分布の定量的な取り扱いをするには、浮流砂量式および移動床の抵抗法則の精度の向上が必要であろう。

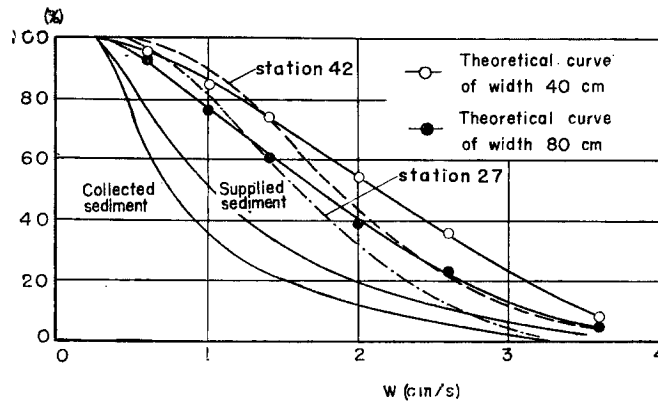


Fig. 12 Comparison between theoretical and experimental values of size frequency distributions of bed sand

4. 結 語

以上著者らは浮流砂量に関する実験を行なって、その濃度分布特性および従来提案されている浮流砂量式に関する実験的検討およびその考察を行ない、とくに後者の問題点として河床粗度、カルマン定数および遮蔽係数が再考慮されなければならないことを明らかにするとともに、新しい浮流砂量式の指針を提案した。さらに浮流砂量式の適用例として、幅が変化する水路の平衡河床形状および河床砂の粒度分布特性に及ぼす浮流砂の影響に関する理論的考察を試み、それが実験結果をかなりよく説明していることを明らかにした。

最後に、この研究を行なうにあたり、実験や資料の整理に大いに助力していただいた大学院学生渡戸健介君および河川災害研究室の諸氏に心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 志村博康：浮遊砂を有する水流の諸特性について，土木学会論文集，第46号，昭32， pp.22—29.
- 2) 日野幹雄：固体粒子を浮遊した流れの乱流構造の変化，土木学会論文集，第92号，昭38， pp.11—20.
- 3) Hunt, J.N.: The turbulent transport of suspended sediment in open channel, Proc. Roy. Soc. London, July, 1954, pp.332—335.
- 4) 岩垣雄一・土屋義人・矢野洋一郎：浮遊現象に及ぼす粒度組成の影響に関する実験，京都大学防災研究所年報，第8号，昭39， pp.353—362.
- 5) たとえば石原藤次郎編：応用水理学，中I，丸善，昭33， pp.24—26.
- 6) Lane, E. W. and Kalinske, A.A.: Engineering calculations of suspended sediment, Trans. A.G.U., Vol.22, 1941, pp.603—607.
- 7) Einstein, E.A.: The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, U.S. Depart. of Agriculture, Soil Conservation Service, Tech. Bull. No.1025, 1950, pp.1—71.
- 8) 芦田和男：断面変化部における河床変動に関する研究 (I)，京都大学防災研究所年報，第6号，昭38， pp.312—327.
- 9) 芦田和男・道上正規：浮流砂を伴う場合の河床変動について，水理講演会講演集，第10号，昭41，

pp.43—48.

- 10) 佐藤清一・吉川秀夫・芦田和男：河床砂礫の掃流運搬に関する研究（I），土木研究所報告，第98号の2，昭31，pp.1—18.