



土木研究所資料 第六一二号

混合粒径特性を考慮した河川の浮遊流砂

昭和四十五年八月

建設省土木研究所

土木研究所資料

第 612 号

混合粒径特性を考慮した河川の浮遊流砂

昭和 45 年 8 月

建設省土木研究所

目 次

1. はじめに	1
2. 浮遊流砂量の理論	2
2-1 濃度分布	2
2-2 基底濃度(その1)	5
2-3 浮遊流砂量公式	7
3. 実験および実測値に基づく(浮遊砂特性の検討)	9
3-1 掃流砂と浮遊砂の接続関係	10
3-2 基底濃度(その2)	12
3-3 実験値による検討(均一粒径)	15
3-4 実測値による検討(混合粒径)	19
4. 実測値に基づく浮遊砂公式の検討	30
5. 実用算定式	35
5-1 実測資料による実用公式の検討	36
5-2 実用公式に関する理論的考察(その1)	42
5-3 " (その2)	50
6. 混合粒径砂に対する試み-河床砂と基底砂の粒度分布-	54
7. おわりに	67
付 録	
I 記号一覧表	70
II 参考文献	73

鹿島試験所長
須賀 堯 三

1. は じ め に

浮遊流砂関数は、河川水理学上はもとより、河川の実際面においても最も重要な問題点の一つである。

特に最近の傾向として、浚渫部、河口部、あるいは貯水池などの埋没 および浮遊砂による河床変動の問題などは緊急を要するものとして、ひろく認識されていることである。浮遊流砂関数に関しては Einstein⁽¹⁾、Lane, Kalinske⁽²⁾ あるいは、Laursen⁽³⁾ など、数多くの貴重な研究が行なわれてきたが、この傾向は近年ますます著しい。なかでも実際河川における実測が盛んに行なわれるようになってきたことは特筆に値しよう。その結果、実測を通じて問題の輪郭がある程度鮮明になってきたことは、大きな収穫としなければならない。

平衡状態の浮遊流砂関数としては、濃度分布式、基底濃度 ca 、およびその河床からの高さ a に議論が集中している。濃度分布式には、渦動拡散係数 E_x として運動量の渦動粘性係数 E を用いた Rouse 式、および E_x を一定とみなした取扱いなどがある。平衡状態を取扱うものとして、濃度分布式は粒径毎に成立し、全体の濃度分布は個々の粒径の濃度分布を重ね合わせたものに等しいとするものが多い。このとき、浮遊の濃度分布は常に理論式にしたがっているとすれば、最大の問題は基底濃度 Ca およびその高さ a ということになる。固体粒子が水中に浮遊するために生ずる乱流構造の変化、すなわちカルマン定数 K や渦動拡散係数 E_x 、あるいは粒子の沈降速度 w の問題は別途取扱わなければならない。

基底濃度 Ca に影響をおよぼす要因は多い。浮遊流砂と掃流砂とは流砂型式が異なるが、掃流砂の濃度が浮遊砂の基底濃度に連続するかどうかについての検討に芦田、道上の研究⁽⁴⁾ などがある。浮遊流砂と掃流砂との接続は、sand wave のある場合と、ない場合とで取扱いが異ってくることも予想されるが、Bishop ら⁽⁵⁾ は ripple, dune および antidune の浮遊流砂量におよぼす影響について、実験値に基づいて検討している。また、sand wave は水温によって変形することが知られ、⁽⁶⁾⁽⁷⁾ w や E_x とも関連して浮遊流砂量は水温の影響を受ける。さらに基底濃度は wash load の含有量の増加にともなって、著しく増大することが、実測や実験を通じて確かめられ^{(8),(9)}、その機構はいよいよ複雑である。

実際の河川では、浮遊流砂の特性は一層多岐、複雑になる。河川では一般に河床

材料は混合粒径である。河床材料、掃流砂および浮遊流砂の間の粒径の関係は、Einstein^[1] や Lane, Kalinske^[2] による研究があるが、実際への適用には問題が残されている。また、河川の流れは三次元的なものであり、浮遊流砂の分布も一様ではない。支川流入の影響も無視することが困難な場合が多く、混合の度合は想像されるほど大きくないのが普通である。河床から浮遊砂がまき上げられる現象や沈降する現象は、非平衡現象として扱えるとき重要である。実験を通じて、浮遊砂が、河床全面からではなく、一部のほとんど限られた範囲から連続的に煙状に巻き上げられる現象が観測されるが、その取扱いについては未解決をいわなければならない。河川では、浮遊流砂濃度は飽和して平衡状態に達していない場合も多いので、このような浮遊流砂の河床への沈降および巻き上りの現象は、浮遊による河床変動の問題を考案するときに重要である。これに関連して、拡散方程式を数値的に解いて、浮遊流砂分布の縦断変化をシミュレートする試みが土屋、星畑、仲道^[10] によりなされている。

ここでは、河川の河道計画や河川管理上必要となる浮遊流砂関致を考案する立場から、特に実用面に主眼をおいて、混合粒径特性の影響を考慮し、次の諸点の検討を行なう。

- a 実験および実測値に基づき、各種浮遊砂公式および浮遊砂特性の検討。
- b 実用算定式の検討。
- c 基底浮遊砂層の粒度分布。

2. 浮遊流砂量の理論

2-1 濃度分布

浮遊現象は連統方程式と運動方程式により表現されるが、濃度分布形は浮遊砂の連統式のみから求められる。渦動拡散係数 E_x が一定の場合は、

$$O/ca = \exp \{ -w_o (z-a) / E_x \} \quad \dots\dots\dots (2 \sim 1)$$

E_x として、運動量の渦動粘性係数を用いると、

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^z \quad \text{ただし } z = \frac{w_o}{Ku_*} (>0) \quad \dots\dots (2-2)$$

である。ここに C : 浮遊砂濃度, w_o : 粒子の沈降速度, Z : 河床からの高さ, u_* はまさつ速度, および h : 水深である。通常 (2-2) 式が用いられるが, $\eta = z/h$, $\eta_o = a/h$ によって無次元化すると,

$$C/C_a = \left(\frac{\eta_o}{1-\eta_o} \frac{1-\eta}{\eta} \right)^z \quad \dots\dots (2-2')$$

となる。濃度分布曲線の形状は、図 2-1 に示すように η が 0 から 1 に移るにしたがい、 C は無限大から 0 まで小さくなってゆく。河床に極く近い所は、 C_x の仮定に問題のあるところでもあり、 C_a の位置 a より河床までの層には浮遊砂はないものとして扱われる。また、 $Z \geq 1$ の場合は曲線は単調減少であるが、 $0 < Z < 1$ の場合には、図 2-1 のように、 $\eta = (Z+1)/2$ において変曲点が生じる。一方、(2-1) の場合には、指数曲線であって、水面においても浮遊砂濃度はゼロにならない。

C_a の代りに $Z = h/2$ の点の濃度 C_{md} をとることにすれば、(2-2) 式は

$$\frac{C}{C_{md}} = \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right)^z \quad \dots\dots (2-2'')$$

となる。

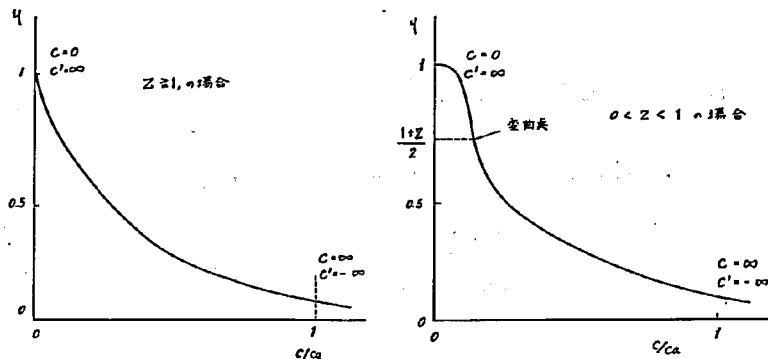


図 2-1 浮遊砂濃度分布曲線 (Rouse 式)

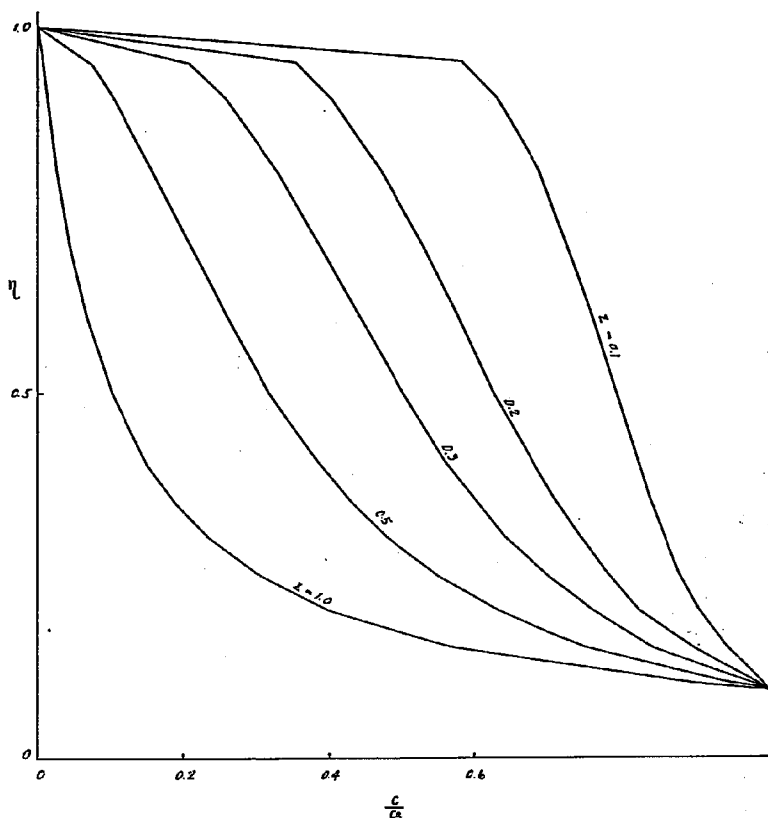


図 2-2 浮遊砂濃度分布 (Rouse 式で $\eta_0 = 1/11$ の場合) $\frac{C}{C_a} = \left(\frac{1-\eta}{10\eta} \right)^z$

流れの流速分布として対数則を適用することになれば

$$u = \bar{u} + \frac{u_*}{K} \left(1 + \ln \frac{z}{h} \right) \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

であるから、単位巾当りの浮遊流砂量 q_s は、(2-2') 式および (2-3) 式より

$$q_s = \int_{\eta_0}^1 cu \, dz = G_{md} \bar{u} h \int_{\eta_0}^1 \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right)^z \left[1 + \frac{u_*}{K\bar{u}} (1 + \ln \eta) \right] d\eta \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

となる。これより、

$$\frac{\bar{O}}{O_{md}} = \frac{q_s}{q O_{md}} = \left(1 + \frac{u_*}{Ku}\right) \int_{\eta_0}^1 \left(\frac{1-\eta}{\eta}\right)^2 d\eta + \frac{u_*}{Ku} \int_{\eta_0}^1 \left(\frac{1-\eta}{\eta}\right)^2 \ln \eta d\eta$$

$$= \frac{\bar{O}}{O_a} \left(\frac{1-\eta_0}{\eta_0}\right)^2 \dots\dots\dots (2-5)$$

のような関係が明らかである。したがって、 $\bar{O}/O_{md}$ は Ku/u_* 、 Z および η_0 の関数で表わされる。

$$\frac{q_s}{q O_{md}} = F_1 \left(K \frac{\bar{u}}{u_*}, Z, \eta_0 \right) \dots\dots\dots (2-6)$$

2-2 基底濃度 (その1)

浮遊砂濃度分布は、以上のように a および O_a が与えられれば定まる。

基底濃度を与える高さ a については表 2-1 のようなほとんどの考え方があ

表 2-1 基底濃度を与える高さ a についての考え方

番号	状 況	η_0	条 件	提 唱 者
1	粒 径 の 2 倍	$\frac{2d}{h}$	flat bed? 粒径毎に η_0 は異なる	Einstein ⁽¹⁾
2	河 床 の 濃 度	$\left(\frac{O_{md}}{O_a}\right)^{\frac{1}{2}}, 0$	_____	Brooks ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ Lane Kalinske
3	Log 則における $u = 0$ の点	$e^{-K \frac{\bar{u}}{u_*} - 1}$	flat bed?	Brooks ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾
4	砂れんの高さ	$\frac{\Delta}{h}$	されん	_____
5	水 深 の %	$\frac{1}{11}, \frac{1}{101} \dots$	_____	_____

Δ : 砂れんの高さ

$a = 2d$ は、Einstein 自らの言によると、物理的考案の結果粒径に関係してくるが、影響するところが大きくないので簡単のために粒径の 2 倍としたということである。第 2 の河床の濃度 (a rize fraction in the bed) をとる考え方

は、拡散による浮遊と転動、滑動および Saltation による掃流とを明確に区別し、もしくは両者を区別せず、河床表面付近における粒度構成をそのまま考慮することにして、 $a = 0$ としたものである。ここで河床の濃度を C_0 とすると、 $C_0 = C(\eta_0)$ 、(2-2')式より、

$$\left(\frac{C_{md}}{C_a}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{C_{md}}{C_0}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\eta_0}{1-\eta_0}\right) \doteq \eta_0 \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

となる。次に、Brooks の提唱による第3の考え方は、物理的根拠を追求する以前の問題として、流速分布として対数則をとる場合には、河床付近において $-\infty$ になる部分を除外すべきであるとしたものである。そこで、流速がゼロとなる点をもって、基底濃度を与えることにした。その結果、浮遊流砂量 q_s は最大値をとることになる。このとき、 $u = 0$ において、

$$\eta_0 = e^{-K \frac{\bar{u}}{u_*}} - 1 \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

であるから、 η_0 は $K \frac{\bar{u}}{u_*}$ の関数であり、(2-6)式より

$$\frac{q_s}{q C_{md}} = F_2 \left(K \frac{\bar{u}}{u_*}, Z \right) \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

のように簡略化される。基底濃度を与える高さ a については、物理的根拠を明確にしないとなれば、いずれの考え方も本質的に異なるものではない。当面は簡単で便利のものが秀れているとされるわけである。この限りにおいて Brooks の考え方には優位性が認められる。

基底濃度の問題の根本的な解決のためには、三次元的な河床形状の、水流の流速分布や流砂型式と流砂量におよぼす影響、拡散運動する浮遊粒子の、掃流砂からの分離および水路底付近の流速分布や渦動粘性係数などが詳細に知られなければならない。Rouse分布も水路底まで適用することはできなく、流速分布の対数則も同様に水路底まで適用することが困難である。ところが都合の悪いことに、流砂は水路底付近が一番問題とされるところに浮遊砂問題の複雑さが存在する。そこで、実際問題として浮遊流砂を計算する場合に二・三の考え方に基つて数多くの公式が作られているわけである。それらは、たとえば Einstein のように、河床付近以外の部分のみを考慮し、浮遊流砂量におよぼす a の影響は大きくないから簡単に基底濃度を与える高さとして粒径の2倍を与えるもの、Laursen の

ように理論を実験値や実測値で補正していくもの、もしくは次元解析により主として実験や実測値に頼るものなどである。

2-3 浮遊流砂量公式

理論的に求められた浮遊流砂量公式は、(2-4)式のように、浮遊濃度と流速の積を、基底濃度を与える高さから水面まで積分することにより与えられる。

Einstein公式では、浮遊砂濃度分布としてRouse分布、流速分布として対数則および基底濃度の高さ a として粒径の2倍の高さを与えている。基底濃度としてはEinstein掃流砂公式によって与えられた掃流砂量が粒径の2倍の範囲内に分布するとして、その平均値を用いている。

次に、Lane - Kalinske型公式を考える。浮遊砂濃度分布として $C_x = hu_* / 15$ ($K = 0.4$ として) の条件から得られた(2-1)式、および流速分布として指数則を用いてみる。Rouse分布式では、河床 $Z = 0$ は定義されないが、(2-1)式では河床における濃度まで与えられる。また流速分布式においても、対数則は河床付近において流速 $u_z = 0 = -\infty$ となるが、指数則では、 $u_z = 0 = 0$ である。このように、浮遊流砂の河床付近の物理的内容は明確でないにしても、式の上では、この型の公式は明確な解を与える。

このほかにも、濃度分布と流速分布の組み合わせで異った形の解は求められるが、簡単な形とはならず、さして意義のあるものではない。河床まで考えられる点において、この型の公式がかたちとしてはすっきりしている。星畑(未発表、部内検討)によれば、流速分布として指数別、

$$\frac{u}{U} = \left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{1}{m}} \quad \text{または} \quad \frac{u}{U} = \frac{m+1}{m} \left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{1}{m}} \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

を用いる。ここに、 U は表面流速、 m は定数でおよそ7付近の値をとる。(2-1)式において、 $a = 0$ とし、河床における浮遊砂濃度を C_0 とすると、

$$\begin{aligned} q_s &= \int_0^h u c \, dz = \frac{m+1}{m} \bar{u} h C_0 \int_0^h \left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{1}{m}} \frac{1}{h} \exp\left\{-\frac{w_0 h}{\epsilon_x} \cdot \left(\frac{z}{h}\right)\right\} dz \\ &= q C_0 \frac{m+1}{m} \int_0^1 Z^{\frac{1}{m}} e^{-\alpha' Z} dZ, \quad \left(\alpha' = \frac{w_0 h}{\epsilon_x}\right) \quad \dots\dots\dots (2-11) \end{aligned}$$

である。各点のセン断力分布

$$\tau = \rho \epsilon \frac{\partial u}{\partial z} = \rho u_*^2 \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (2-12)$$

より、流速分布として(2-10)式の指数則を求めれば、渦動拡散係数を、Rouseと同様に運動量の渦動粘性係数とすることにより、

$$\epsilon = \frac{m^2}{(m+1)} \frac{u_* h}{h^{1/6} / (n \sqrt{g})} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{m-1}{m}} \quad (2-13)$$

である。Kalinske式では $\epsilon_x = \text{const}$ としているので、(2-13)式の ϵ を平均すれば、

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{h} \int_0^h \epsilon dz = \frac{m^2}{(m+1)(2m-1)(3m-1)} \frac{n \sqrt{g}}{h^{1/6}} h u_* \quad (2-14)$$

となる。したがって、(2-11)式の α は、 $\epsilon_x = \bar{\epsilon}$ とすれば、

$$\alpha' = \frac{w_o h}{\epsilon_x} = \frac{(m+1)(2m-1)(3m-1)}{m^2} \frac{h^{1/6}}{n \sqrt{g}} \frac{w_o}{u_*} \quad (2-15)$$

である。Lane-Kalinske型公式では、(2-11)式の関係は、

$$q_s = q_0 C_o P \quad (2-16)$$

$$P = \frac{m+1}{m} \int_0^1 z^{\frac{1}{m}} e^{-\alpha' z} dz \quad (2-17)$$

と現わされる。Pは流速分布の指数 m 、 $h^{1/6} / (n \sqrt{g})$ および w_o / u_* の関数である。(2-17)式は級数展開してから積分すると、

$$P = e^{-\alpha'} \left(1 + \frac{\alpha'}{2 + \frac{1}{m}} + \frac{\alpha'^2}{(2 + \frac{1}{m})(3 + \frac{1}{m})} + \dots \right. \\ \left. + \frac{\alpha'^{i-1}}{(2 + \frac{1}{m})(3 + \frac{1}{m}) \dots (i + \frac{1}{m})} + \dots \right) \quad (2-18)$$

と現わされる。

浮遊砂の河床における濃度 C_o は別途求められなければならない。Laur sen⁽³⁾は K 、 a および C_a を量的に表すことが困難であるとして、実験結果に物理的な考察を加えて実験式を求めている。また、Einsteinの考え方を踏襲し、膨大な実験資料と河川の実測値を用いて、掃流と浮遊の全流砂量に対する考察を行ったChang⁽¹³⁾らの研究もある。土屋、星畑⁽¹⁴⁾は、Laur senの考え方につ

いては、濃度分布についての現在までの研究成果を導入したいとし、また、Chang らの提唱する公式については、使用している係数になお粒径効果の検討が十分でないとして、Kalinske と Laursen の考え方を折中した考え方に基づいて資料を整理し、新しい浮遊砂算定式を提唱している。

3. 実験および実測値に基づく浮遊砂特性の検討

浮遊に関する実験的研究は非常に広く行われている。しかし、流れの河床におよぼす作用、流れの作用により移動する砂粒子の運動機構、浮遊流の内部機構の変化および河床形状の変化とその影響など、なお多くの解決されるべき物理的な問題が残されている。実験水路においては、浮遊砂現象も単純化されているのであるが、このような場合においてすら、流れが細かい浮遊砂によって混濁し、運動状況の観察が容易でなく、その測定も誤差を含む割合が多い。このような事情も現象の物理的解明を遅らせている一因であろう。

河床付近の浮遊砂運動の観察結果から、おおよそ次のような特徴がみられる。

(図 3-1)

- a 滑面水路上では、流速が小さいとき砂粒子の移動は主として滑動および転動であり浮遊するものは少ない。
- b 二次元的な砂れんが発生している場合には、通常の Saltation 運動はそれ自身で完結していることが多く、浮遊状態になることが少い。流速を増していくと、砂れん背面での巻き上りも多くなるが、砂れん頂点付近での粒子の巻き上りが増加する。この中にはすぐ下流の砂れんの谷の部分に存在する渦を越えて流下するものも現われる。
- c 砂れん背面に強い渦が発生すると、砂れん背面の下流部からの逆流で運ばれる砂粒子が、砂れん背面をはい昇る急いで上方へ連続的に巻き上げられる現象がみられる。この現象は浮遊砂の発生にかなり効果的である。さらに、砂れん形状が三次元になって発達した場合には、あたかも煙突からはき出される煙のように継続して強力な浮遊の発生がみられる。

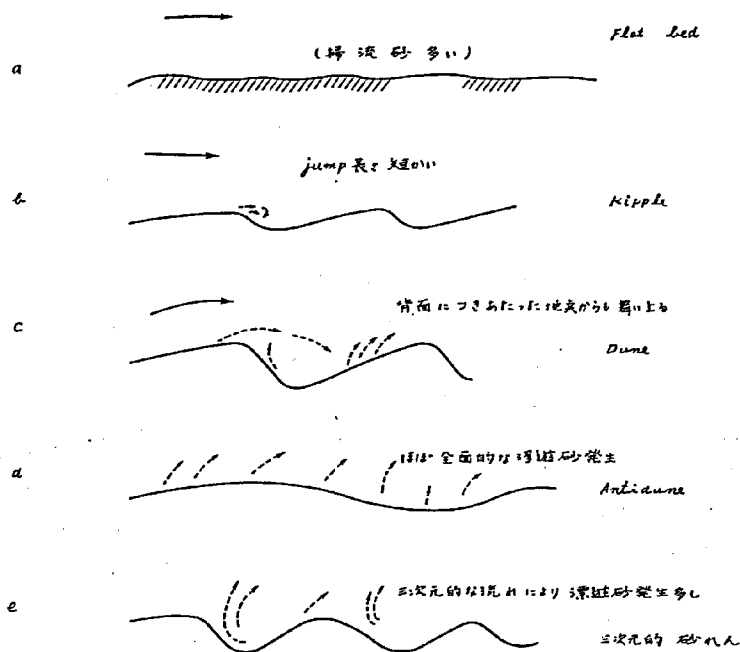


図 3-1 砂れん形状と浮遊砂の発生状況スケッチ

d 掃流力をさらに増加させると、全表面から砂粒子の舞い上がりがみられるようになる。この場合、小さい渦では小径砂のみしか浮上しないが、大きい渦では大小の粒径砂が一緒に浮上する。

3-1 掃流砂と浮遊砂の接続関係

Einrtein は、粒径の 2 倍の厚さの掃流層を想定して、浮遊砂は濃度および粒径分布もそれに接続すると考えた。芦田、道上⁽¹⁵⁾ は、平均粒径 $d_m = 0.122$ mm の混合砂を用いて実験を行い、河床付近 ($z/h = 0.028$) では河床砂の粒度分布と浮遊砂のそれとがあまり変っていないことを示した。そして、浮遊砂の濃度は、河床から粒径のオーダーの高さで掃流砂のそれに接続していると考え、掃

流砂によって河床付近の濃度を表現することが妥当であるとしている。

一方、土屋 星畑⁽¹⁴⁾によれば、掃流と浮遊とが連続しているとするよりも Kalinske のように河床と直接関係をもたした方が良いとしている。また Chang⁽¹³⁾ らのように、判然と区別しがたい掃流と浮遊とを分けて考えるより、当面全量で考えておこうとする見方もある。

浮遊の巻き上りの現象は、図 3-1 にみられるように、河床に砂れんが発生している場合と平坦な場合とでも異なるであろう。また、粒径の大きさにも関係するが、掃流砂の運動形態にも関係してくると思われる。流砂型式は、主として拡散現象である浮遊と、saltation および contact（転動、滑動）による掃流に区別されるが、転動および滑動による掃流砂が、そのまま浮遊砂に連続するには、なお、議論の余地が残されている。この場合、平坦河床では contact load が多く、砂れんの発達している河床では contact load のほかに saltation load もみられることが多い。このことから、ただちに浮遊と掃流は平坦河床では連続しなく、砂れんの発達している河床では連続することは早計といわなければならないが、傾向として定性的にはおおむねその妥当性を認めることができるであろう。すなわち掃流砂の平均濃度 $q_B/(u_b a)$ と C_a は何んらかの関係の有するものと推定される。しかし、この関係が単純なものであるとは考えられない。ここに、 u_b は掃流層内の平均流速である。

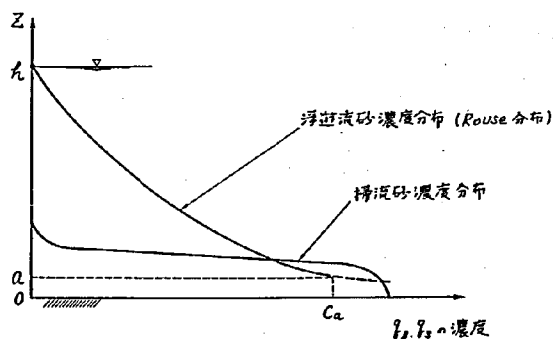


図 3-2 浮遊および掃流砂の接続関係

表 3 - 1

流 送 土 砂	Bed load 掃 流	Contact Saltation	転動 滑動 飛躍 (上ってから乱れの影響をあまり受けないと考えられるもの)	d ~ 2 d に分布
	Suspended load 浮遊砂	Suspension	浮遊 (乱れがなければゼロ)	理論分布
	Wash load	Suspension	浮遊 (乱れがなくても存在)	均一分布

3-2 基底濃度 (その2)

河床付近における浮遊砂濃度と掃流砂濃度との接続関係は半然としたものではない。したがって、当面基底濃度を想定する場合に、大別して3通りの考え方があ。すなわち Einstein のように掃流砂濃度と接続させて C_a を定める方法、Kalinske のように掃流砂は考えずに河床において C_b を定める方法、および Laursen のように基底濃度という考え方を適用しないものなどがある。

Einstein は、 $a = 2d$ の点の濃度が掃流砂の平均濃度に等しいと考え、

$$C_a = q_b / (u_b a) \quad (3-1)$$

とした。この場合、理論上、掃流砂の濃度分布、掃流層の平均流速 u_b 、などが問題となるほか、粒径毎に a の位置が変わってくるということになるが、浮遊流砂に関する先駆的な研究として高く評価されている。

同様の考え方で、(3-1) 式において q_b を Einstein 式で与える代りに、佐藤、吉川、芦田公式で与えれば

$$P_b q_b = \varphi F \left(\frac{\tau_o}{\tau_c} \right) \frac{u_*^3}{\left(\frac{\rho}{\rho_s} - 1 \right) g} P \quad (3-2)$$

であり、 $u_b = \beta u_*$ として、

$$P_b C_a = \frac{\varphi}{\beta} F \left(\frac{\tau_o}{\tau_c} \right) P \frac{u_*^2}{\left\{ (\rho / \rho_s) - 1 \right\} g a} \quad (3-3)$$

となる。ここに、 φ は粗度の関係で与えられる。 β は定数ではなく、どのような関数形であるかはさらに多くの実験値から定めなければならない。 P_b および P

はそれぞれ粒径 d の粒子が、掃流砂および河床砂において占める割合とする。

Brooks⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ もほぼ Einstein と同様な考え方に基づき、計算式の簡略化に努めている。この場合、 a の位置は粒径に関係なく、流速分布の対数則において $u = 0$ となる点が選ばれているので、未知量が一つ少なくてすむわけである。

以上のような考え方は、掃流砂と浮遊砂との関係を重視したものであるが、掃流砂のうちの流砂型式 (Saltation および contact) を区別するところまでは及んでいない。掃流砂に関する Einstein 公式および佐藤、吉川、芦田公式は共に理論的には、Saltation を重視し、実験値に基づき係数の中で contact load を考慮したものである。したがって現状において浮遊砂濃度と掃流砂濃度とを接続させる考え方は、掃流砂に関する研究、さらに砂れん形状とその影響に関する研究の進歩と共に道がひらけてくるであろうと期待される。

なお、基底濃度の高さを与える a によって全体の浮遊流砂量がどのように変化するかを、簡単な例によって試算すると図 3-3 のようである。計算の条件としては、佐藤、吉川、芦田公式による掃流砂濃度が浮遊流砂濃度に接続するとし、

$$q_s' = q_s \frac{0.216 \{ (\rho_s / \rho) - 1 \} g k}{(\varphi / \beta) F}$$

$$= u_*^3 \left\{ \left(\frac{\bar{u} K}{u_*} + 1 \right) I_1 + I_2 \right\} \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

ここに、 I_1 および I_2 は a/h , w_o/Ku_* の関数として Einstein により数値計算の結果が図に表示されている。 a は Einstein にならって粒径 d の関数とし、 $a = \alpha d$ とおき、 q_s' におよぼす α の影響を調べることにした。水理量としては、水深 $h = 4$ m, 勾配 $I = 1/2.500$, 粗度係数 $n = 0.03$, カルマン定数 $K = 0.4$, 水温 18°C として試算した。図 3-3 によれば、粒径が小さくなるに従い、 α の影響が出ていることがわかる。浮遊流砂量は基底濃度をとる位置にあまりどん感ともいえないようである。

次に、河床における浮遊砂濃度 $\bar{C}$ を用いる考え方は、はん雑な掃流との接続関係を追求することを避け、簡単に浮遊砂濃度分布の理論式を主体とし、実験および実測値によって $\bar{C}$ を定め、浮遊砂公式とするものである。このような方法は、適用できる理論を最大限に活用し、未解決の部分を、物理性を考慮しながら次元解析的手法によって補うもので、当面一つの有力な方向を示唆している。

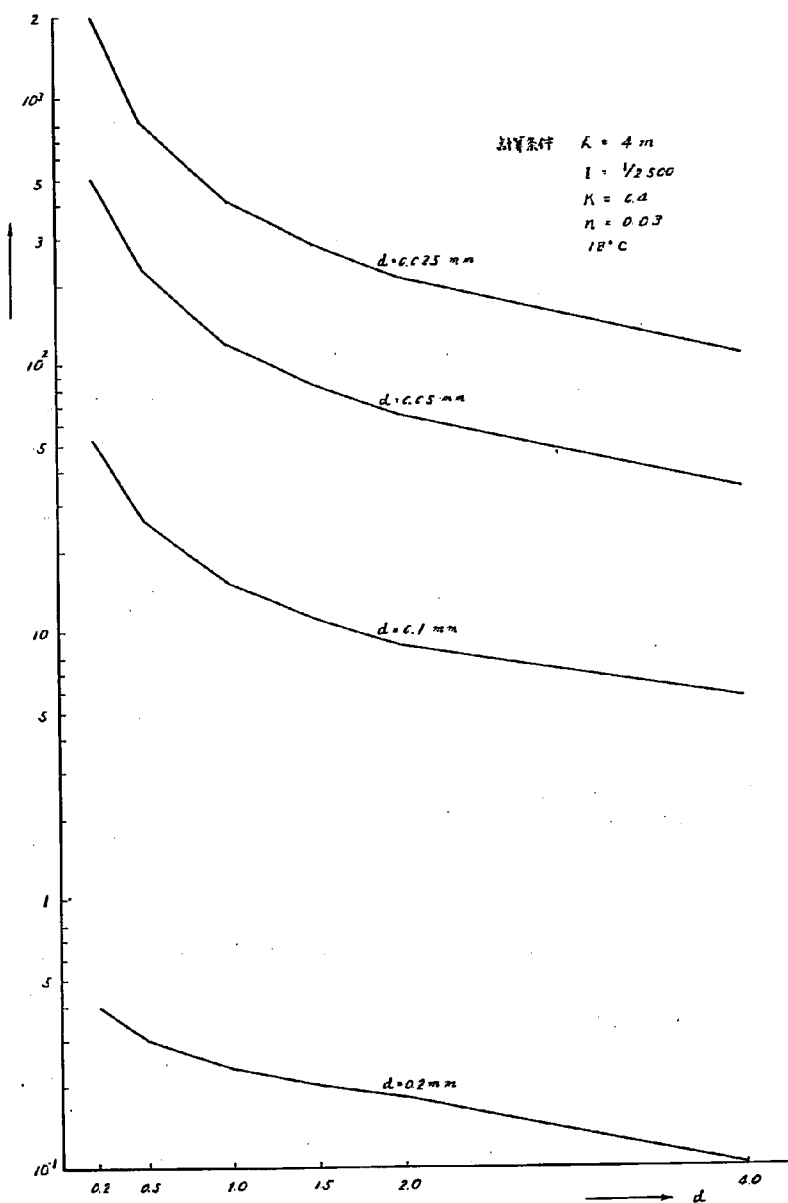


図3-3 浮遊流砂量におよぼす a の影響 ($a = \alpha d$)

Kalinskeおよび、土屋、星畑の研究⁽¹⁴⁾はこのような方向を目指すものとして注目値する。この場合浮遊砂関数は(2-16)式のように簡単な形となって使用に便利である。

基底濃度に関する第3の方法は、もはや基底濃度という概念を用いずに、次元解析的手法によって、いきなり浮遊砂量を定めてしまうものである。Laursen⁽³⁾はカルマン定数Kや基底濃度 O_b などを量的に表示することが困難であるので現状では実験効果を物理的に考察して実験公式を作成することが有効であろうと考えて、掃流砂を含めた全流砂量に対し以下の実験式を提案した。

$$\bar{c} = 2.65 \frac{q_s}{q} = \Sigma p \cdot \left(\frac{d}{h}\right)^{\frac{7}{8}} \left(\frac{\tau_o'}{\tau_c} - 1\right) f\left(\frac{u_*}{w_o}\right) \quad \dots\dots (3-5)$$

$$\tau_o' = 0.0172 \bar{u}^2 \left(\frac{d}{h}\right)^{\frac{1}{3}}$$

ここに、 $\bar{c}$ は重量で表わした平均濃度(%), q_s は単位巾当りの全流砂量(容積単位), p は粒径 d のものが河床中に占める割合, τ_o' は砂粒による有効掃流力で単位は $(\text{dyne}/\text{cm}^2)d$, h は (cm) , $\bar{u}$ は (cm/s) 単位である。

$f\left(\frac{u_*}{w_o}\right)$ は図3-4に示されるように $u_* / w_o \leq 1.5$ の範囲では u_* / w_o とともにわずかに増加する程度であるが、 u_* / w_o が $1.5 \sim 2.0$ をこえると f は急増し、流砂量が非常に多くなるというものである。Laursen 公式の構成は、(3-2)式の佐藤、吉川、芦田式と非常によく似ており、後者の ϕ にあたる係数が u_* / w_o の関数として表示されているものである。

3-3 実験値による検討

浮遊流砂特性について、実験水路による資料に基づき、二、三の解析を試みる。実験水路の場合は、均一粒径の砂を使用するが多い。また、実河川に比して水深が小さく、Reynolds数も小さいが、詳細な、精度よい資料が得られることが特徴である。使用した資料は、主としてコロラド州立大学の膨大にして詳細なデータ⁽¹⁶⁾(以下c.s.u.Dataと呼称)である。c.s.u.Dataは平均粒径0.19, 0.27, 0.28, 0.45, 0.93 mmのほぼ均一粒径の砂による、じゅん環水路の実験資料である。

主な結果は次のようである。

February, 1958

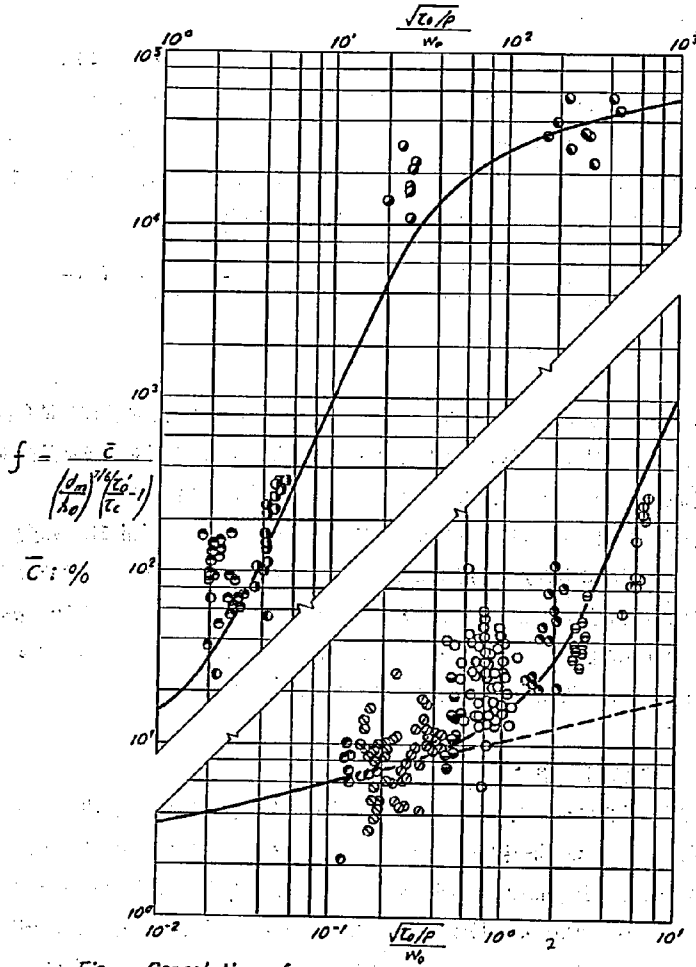


Fig. Correlation of mean concentration with hydraulic and sediment characteristics.

图 3-4 Laursen 公式

a $q_s \sim U_*^M$ の関係 (M =定数)

これまでの研究により、流砂量と U_* との関係はほぼ表 3-2 のようである。

表 3-2, $q_s \sim U_*^M$

M	流砂形式	提 唱 者	備 考
3	掃 流	佐藤, 吉川 芦田 公式	(3.4) 式によれば浮遊でも ほぼ $M=3$ となる。
4	全流砂量	山 口 (17)	F_T の小さいところを除く
5	全流砂量	Brown 公式 土屋・星畑 (14)	Laursen 公式 $U_* / w_o > 2$

佐藤, 吉川, 芦田公式は、掃流砂に対するもので、河川の実測資料によっても相当程度まで、その信頼性が確認されている。図 3-5 は土木研究所の実験資料を整理しなおしたもので、公式の理論チェックに使われたものである。しかし、土木研究所の星畑 (口述) の指適するところによると、全体としては $q_b \propto U_*^3$ であるが、各粒径毎にみると、必ずしも $M=3$ ではなく、ほぼ $M=5$ 程度になっていることがわかる。このことは更に多くの資料によって調べなければ断定的なことはいえないが問題の多様性の一端を示すものである。 $M=4$ の実験は、河口砂州が出水時に崩壊するときのような高速流時のものである。土屋, 星畑 (14) の $M=5$ は C. S. U Data のうち $U_* / w_o > 1.2$ で掃流よりも浮遊の多くなる範囲の資料から得られたものである。

b 各種影響要素

実験値を用いて、例えば $q_s \propto U_*^M$ の関係を調べるときなどは、点がかなり広くばらつくのが普通である。その原因として、実験誤差の他に、次のようなものが考えられる。すなわち、(a) 粒径効果、Laursen は U_* / w_o で整理している。(b) 篠原, 椿 (18) による流砂運動に寄与する掃流力 τ_o , $\tau_o / \tau_o = \phi' / \phi'_o$, $\phi' = u / u_*$, $\phi_o = 6.0 + 5.75 \log (h / k_s) \dots$ (3.7) (c) 砂れん, Bishop (5) はされん形状によって浮遊砂量が異なることを、C. S. U Data を用いて示している。また実験を通じて、三次的に、複雑

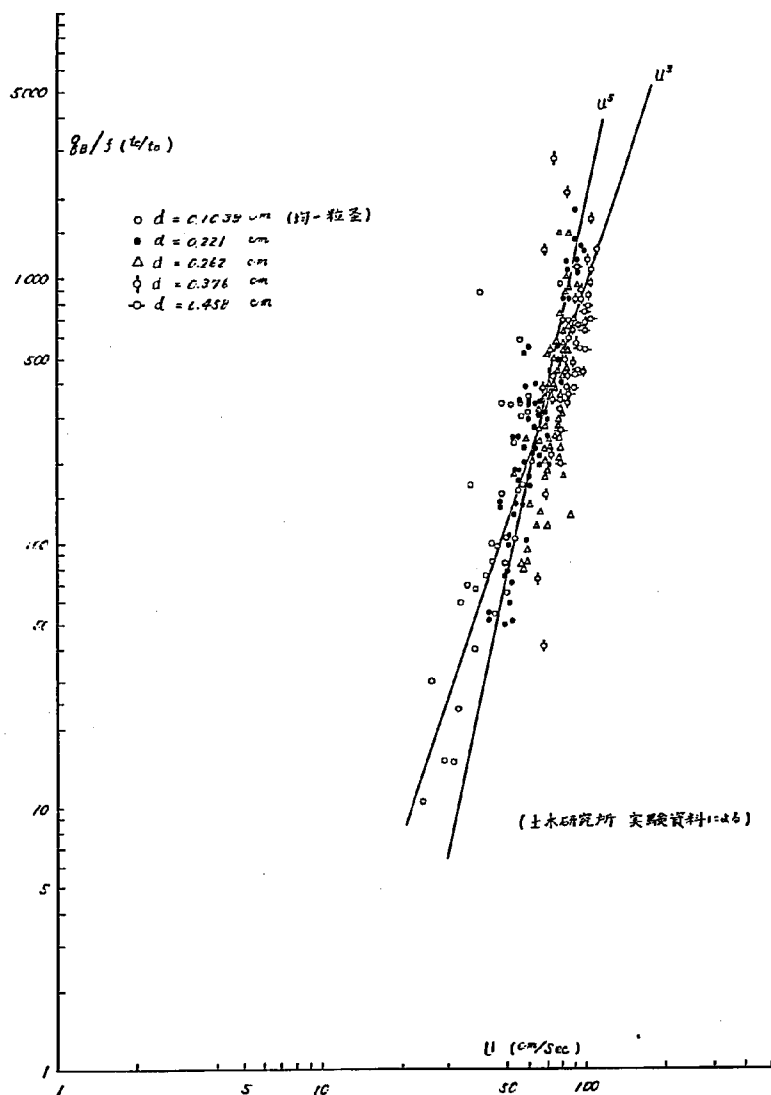


図3-5 $Q_B / F (\tau_0 / \tau_0) \sim U$

な河床の場合ねじれ上昇流によって煙状に砂がまきあげられる現象も観察される。および Reynolds 数、渦の規模およびその発生確立分布、水深や川幅に関係した大規模な渦、などであろう。

確立的な渦の作用の仕方はともかくとしても、時間平均的に考えて、河床の砂に直接影響を及ぼす水理量としては $\tau_{e*}(\tau_e / \{(\rho_s - \rho)gd\})$, τ_e/τ_c または $(\tau_e - \tau_c) / \tau_c$ などが考えられる。これらの力によって河床から浮上した砂を拡散させ、浮遊させる過程においては u_* / u_0 など影響をおよぼすのであろう。また、河床砂に有効に力のかかる面積の割合、および渦の規模によって何層の砂が一度に浮上するかといった基礎的な問題も、なお今後の重要問題として残されている。

3-4 実測値による検討(混合粒径)

河川における実測値は、混合粒径のものであり、Reynolds 数も大きい。建設省技術研究会の実測を通じて得られた浮遊流砂の特性はおおよそ次のようである。

a 浮遊流砂の粒径別濃度分布

大径砂は水深方向に大きく濃度変化するが、粒径が小さくなるにしたがい、一様濃度分布に近づく。粒径別の濃度は、小径砂、大径砂よりかなり割合が多い。ただし、粒径が小さくなればなるほど小径砂の浮遊砂量が多くなるということではなく、小径砂のある粒径範囲の浮遊砂量をピークにして、それ以下の粒径の砂は少なくなることは当然である図 3-6 および図 3-7 はそれぞれ十勝川および斐伊川の実測例である。

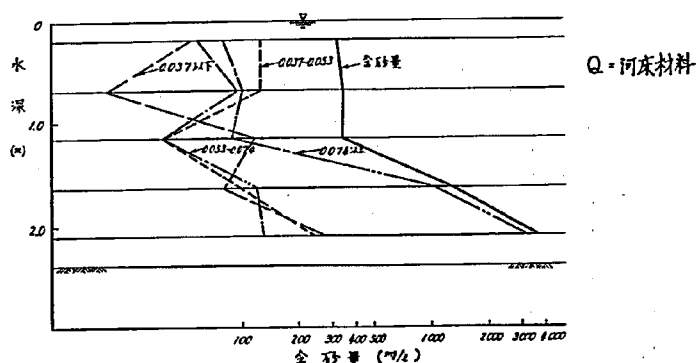


図 3-6 浮遊砂粒径別濃度分布 (S4 3.8.4 調査十勝川帯広側線 B)

斐伊川 深光寺橋 (4.3K)

S 43. 9.25 左岸より 260 m

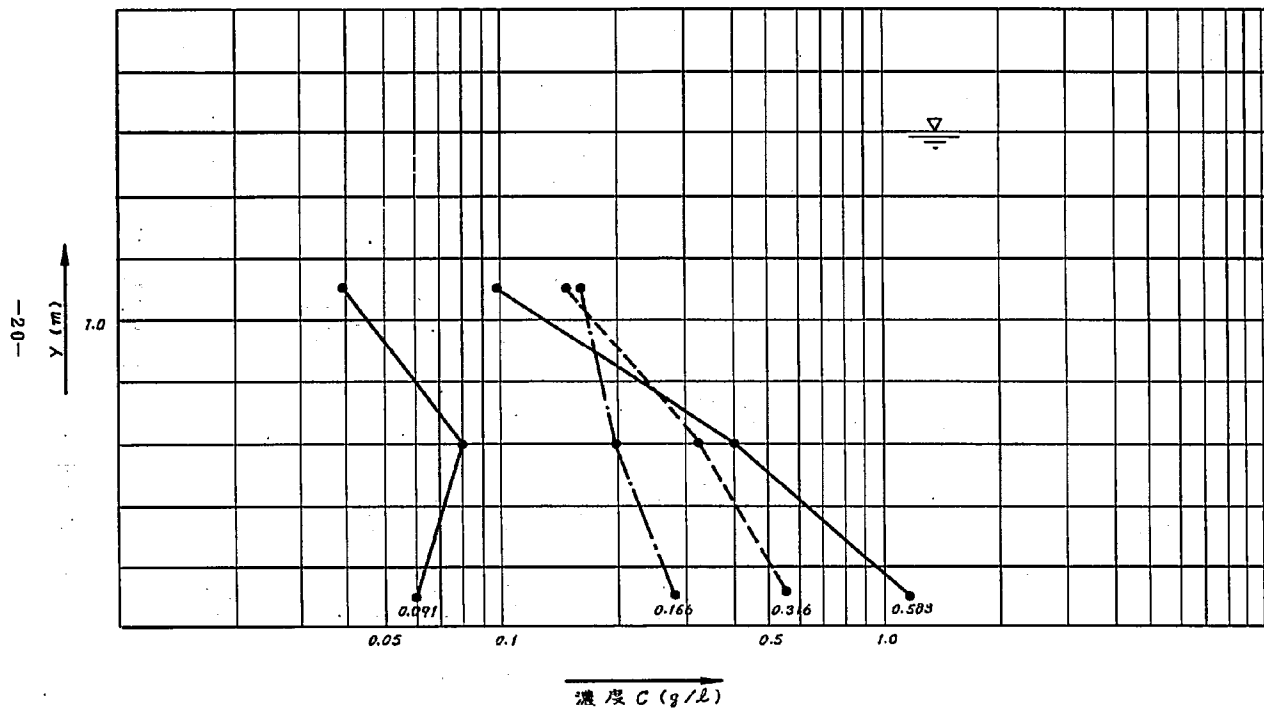


図 3-7 濃 度 分 布 図

長良川墨俣においては、流量範囲 $50 \sim 3800 \text{ m}^3/\text{s}$ にわたり、約 50 回におよぶ浮遊砂観測が実施されている。これらの測定のうち、流量 $51 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1528 \text{ m}^3/\text{s}$ および $3795 \text{ m}^3/\text{s}$ の各ケースについて、浮遊砂の粒度分布の水深方向の変化は図 3-8～図 3-10 のようである。これらの 3 つの図を通覧して、浮遊砂の粒度分布は深さ方向にあまり変化していないことがわかる。鉛直方向の各粒度分布の平均的な 50% 粒径 d_{50} は、流量の小さい方から、それぞれ、 0.06 、 0.03 、および 0.04 mm となっている。流量が小さい時に浮遊砂の粒径が少し大きい原因ははっきりしたことがわからない。しかし、いずれの場合も河床砂の粒度分布に比し著しく小さい。流量が $1528 \text{ m}^3/\text{s}$ と $3795 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合とでは最少粒径はどちらも 0.01 mm 程度であるが、浮遊砂の最大粒径は、 $1528 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合で 0.07 mm 程度、 $3795 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合には、水深の大きい所で極くわずかに粒径の大きい砂も浮遊しており、 0.4 mm 程度となっている。長良川墨俣における実測例からは、流量の大きい時は河床付近の浮遊砂を除いて、その他は河床にはほとんど存在しない細かい流砂であって、Wash load と考えてもよいようなものである。ただし、水理量と無関係であるものが Wash load であるとの定義に従えば、後述の図 4-2 のように長良川墨俣の浮遊砂量にはほぼ $Q_s = 1.0 \cdot Q_f$ (m^3/s 単位) のような関係が見い出されているので、必ずしも Wash load ときめつけてしまうわけにはいかない。図 3-11～図 3-13 は採水水深 0.2 h 、 0.6 h および 0.8 h の場合について、50% 粒径と最大粒径の流量による変化を調べたものである。これによると、 d_{50} はいずれの水深位置においても、ほぼ 0.03 mm 程度であって、しかも流量による変化がほとんど見られない。 $d_{\max}$ はかなりばらついており、多少流量の増大とともに大きくなっているようにも見受けられるが、水深位置によると変化については、ほとんど有意差が見られないようである。

b 河川の浮遊流量と掃流砂量

建設省技術研究会の実測資料によれば、測定範囲では、Wash load を含めた浮遊砂の濃度は $100 \sim 1000 \text{ p. pm}$ 程度である。一方、これまでの掃流砂量観測の結果によれば、掃流砂量の濃度は $0.01 \sim 10 \text{ p. pm}$ 程度の範囲であって、オーダー的に見て、浮遊砂量と相当大きな差がある。これは、

実験水路のような水深の小さい場合と異り、総浮遊砂量の1%が河床砂との関係があるとしても、浮遊による河床変動は無視することができないであろう。

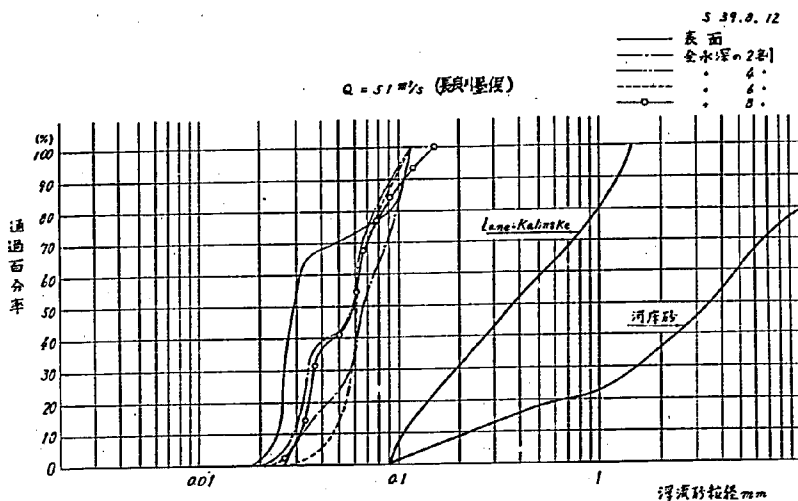


図 3-8 浮流砂量の粒度構成 測線 4

c. 洪水中の浮遊流砂量の変化

一つの洪水を通じて、水位—流量曲線は、定常流でない河川においては一つのループを描く、不定流特性のみられる河川では、浮遊流砂量も一般に増水期に多く、減水期には、急激に減少するといわれている。〔20〕〔21〕

図 3-14 は洪水中的浮遊砂濃度の変化を示す例で、吉野川中央橋における観測結果である。これによると、洪水中にピークの現われる順位は、勾配変化測定値はないが、浮遊砂濃度、流速、水位、流量の順になっている。この問題は q_s と水量との関係をさらに追求する必要がある。しかし多くの河川において、浮遊砂濃度は出水のかなり早い時期にピークが現われているようである。また、流量よりは流速やまさつ速度との関連が強いことも明らかである。後述の図 4-2 の長良川墨俣における浮遊砂の観測例においては、流

量 $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 付近において浮遊砂量の点がかかなりばらついている。増水期と減水期の測定点をわけることができないが、興味ある問題である。また、増水期には気泡が多く発生することが多くの河川において観察されているが、浮遊砂の浮上機構との関係も今後に残された大きな問題といえるであろう。

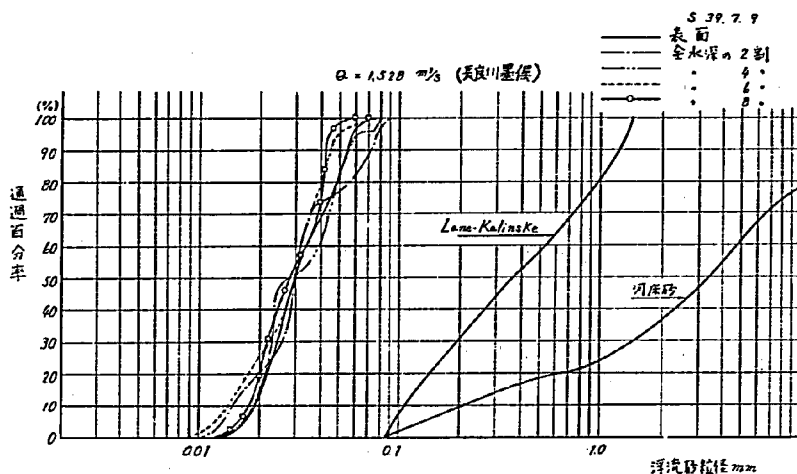


図 3-9 浮流砂量の粒度構成 測線 4

d 飽和度

河川の浮遊砂濃度は、上流の各支川の影響や降雨特性の影響があるといわれている。相当に長い河道であるか、乱れの大きい河川でないと飽和に達しているかどうかの問題とされる。また Wash load とみられる細かい浮遊砂は簡単に沈降しないものと考えられる。

一例して、旧信濃川は、洪水時には上流の信濃川から流下してくる洪水は大河津分水具において直接海に放流され、通常は旧信濃川の流量に影響をおよぼさない。しかし、比操作によって信濃川の水を旧信濃川に通水することも可能である。旧信濃川の関屋分水分派点近くの帝石橋における実測によると、同一水位、同一流量の条件においても、浮遊砂濃度は、大河津における信濃川の洪水の流入量の影響を大きく受けることが判明した。帝石橋における浮遊砂濃度は、信濃川の流入がないと $Q = 300 \sim 500 \text{ m}^3/\text{s}$ で $70 \sim$

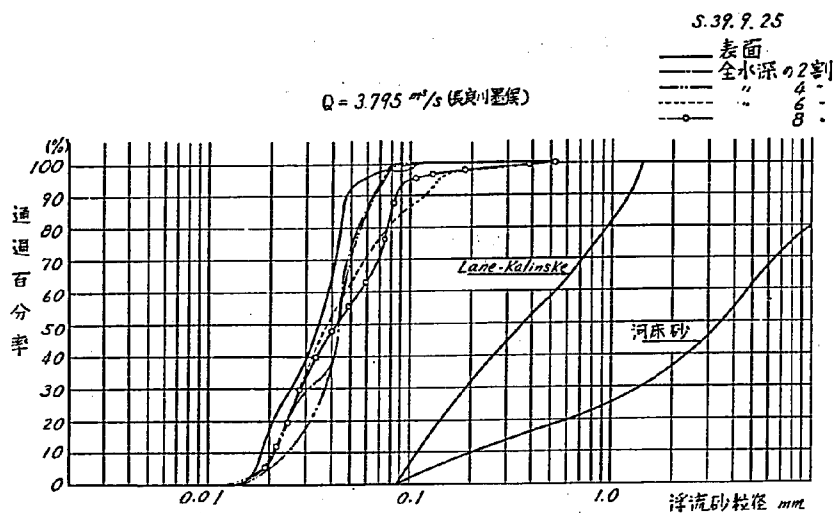


図 3-10 浮流砂量の粒度構成

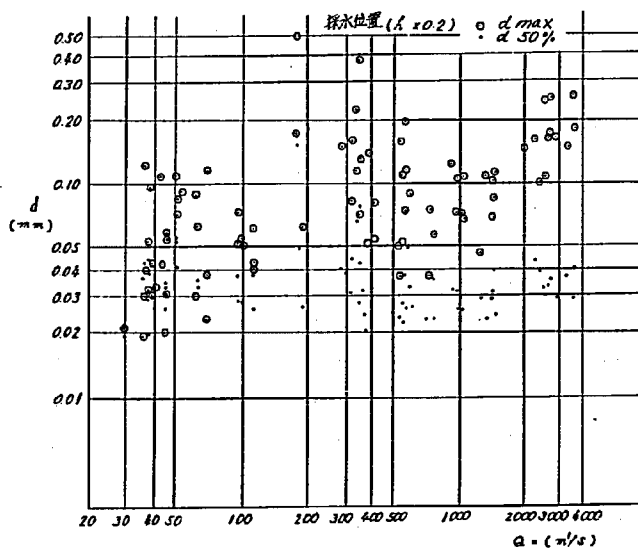


図 3-11 長良川墨俣流量～浮遊砂粒径相関図

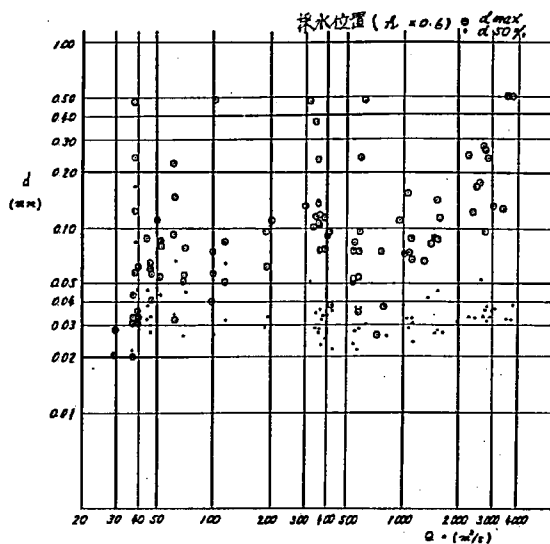


図 3-12 長良川墨俣流量～浮遊砂粒径相關図

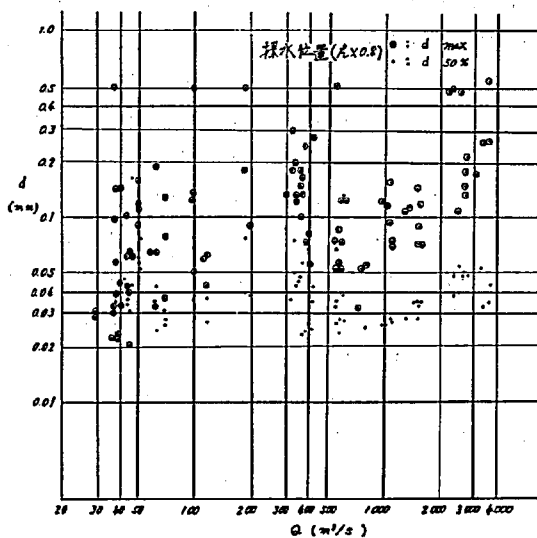


図 3-13 長良川墨俣流量～浮遊砂粒径相關図

150 ppm程度であるが、 $Q=422 \text{ m}^3/\text{s}$ (s 40, 9, 19), このうち $270 \text{ m}^3/\text{s}$ の信濃川の洪水を大河津において流入をさせた時には、

1099 p. pm の濃度が測定された、常石橋～大河津間の距離は約50 kmほどあり流下時間は相当長いはずである。大河津における浮遊砂濃度や浮遊砂濃度の縦断変化の実測は行われていないので断定的なことは言えないが、上流の浮遊砂濃度が、相当下流まで影響していることは事実のようである。

e 高濃度の浮遊流

日本の河川では、あまり高い浮遊砂濃度は観測されていないが、外国ではかなり高い濃度の観測例もある。Nordin はアメリカ、リオグランデ河支川のリオブエルユという小さい河において、表3-3のような、非常に高い浮遊砂濃度を実測した。Cohesive bed の場合の流れはFroude 数も大きくなく、水面の波も発生していなかったが、Sand bed の場合の流れは、Froude 数も大きく、Upper Regime に属する流れであった。また9月11日の実測浮遊砂の中央粒径は約0.1 mmであった。

このような高濃度の浮遊流は、荒れた砂ばく地帯で細かい粘土、あるいはシルト分の多い河川では多く見られる。Nordin によると、このような高濃度な浮遊流が生じるためには、極く細かい粒子の浮遊砂が存在することが必要であり、シルトあるいは粘土分の存在が砂の浮遊砂の増大を促進させるようであるとしている。表3-3によれば、細かい浮遊砂はカルマン定数の変化にあまり大きい影響を与えていない。乱流構造は浮遊砂濃度だけでなく、その粒径の影響を受けることを示唆するもので興味深い。高濃度の場合には、図3-15のようはNordin がその主因にあげている。沈降速度が大幅に減少すること(温度変化の影響も大きい)、密度勾配がつくこと、および渦動粘性係数が変化することなどが考えられる。また、吉川、福岡^[9]の実験によれば、流水中に微細砂の浮遊量が増大するにつれ、速度勾配が増大するために、すなわち、河床に作用する掃流力が増大し、その結果流送される浮遊流砂量が増加することが明らかにされている。これらの実測や実験により明らかにされた事実は非常に興味ある問題であり、さらに詳細な物理的原因追求の研究が望まれる。

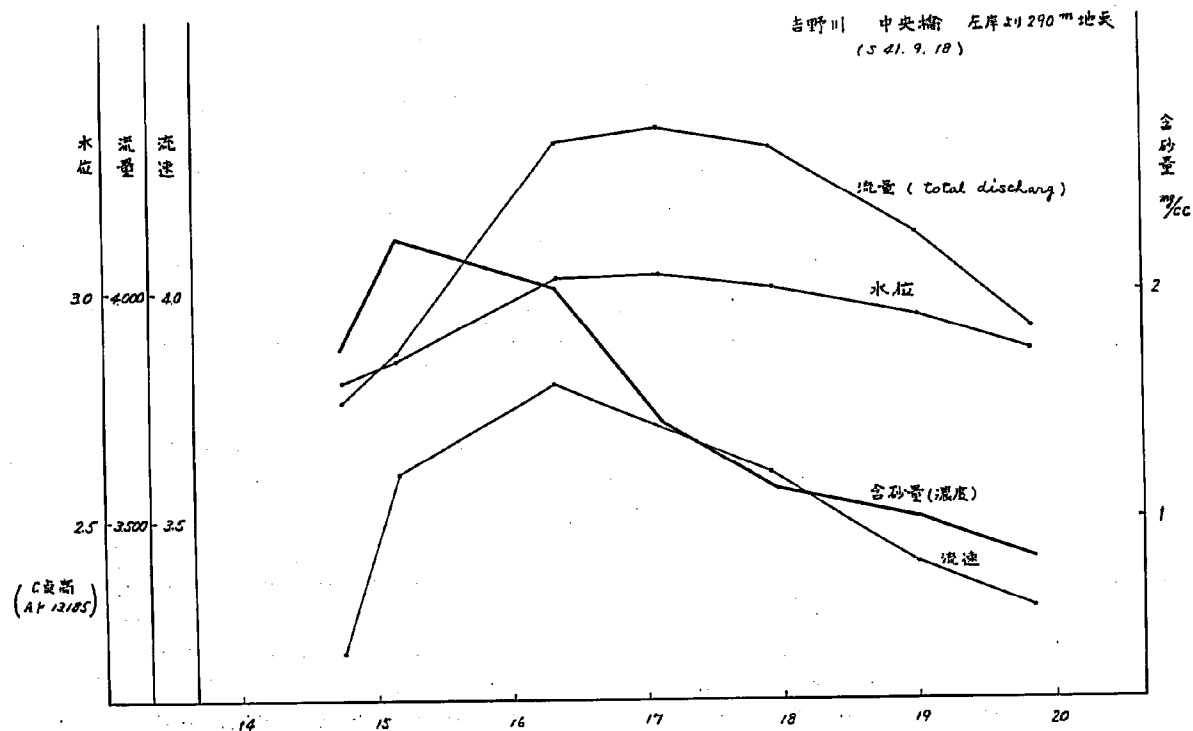


図 3-14 洪水中的浮遊砂濃度の変化

表 3-3 高い浮遊砂濃度の実測例 (Rio Puerco河, Nardin)

Date 1961	Water Discharge in cfs Q	Mean Depth in feet H	Mean Velocity in fps U	Water Surface Slope I	Water Temp: in de- rees Fahren- heit	Froude No. Fr	Manni- ngs n. in feet 1/6	Turbu- lence Coeffi- cient K	Suspended-Sed- iment Concentration		Remarks.
									All sizes in ppm	Coarser than 0.062mm, in ppm	
July 10	403	1.71	2.88	000038	72	0.39	0.014	0.32	75800	454	Cohesive bed
Aug. 18	314	0.74	1.76	000073	82	0.36	0.018	—	110000	—	Cohesive bed
Aug. 18	636	2.08	3.40	000049	75	0.42	0.016	0.40	178.000	712	Cohesive bed
Aug. 19	2380	4.47	4.46	000024	74	0.37	0.014	0.46	132000	3560	Cohesive bed
Aug. 30	546	0.29	1.14	000105	79	0.37	0.018	—	60.000	—	Cohesive bed
Sept. 11	1110	2.08	5.87	000122	66	0.72	0.014	0.23	175000	69.000	Sand bed
Sept. 20	1430	2.48	6.48	000148	63	0.73	0.016	0.29	240.000	83300	Sand bed

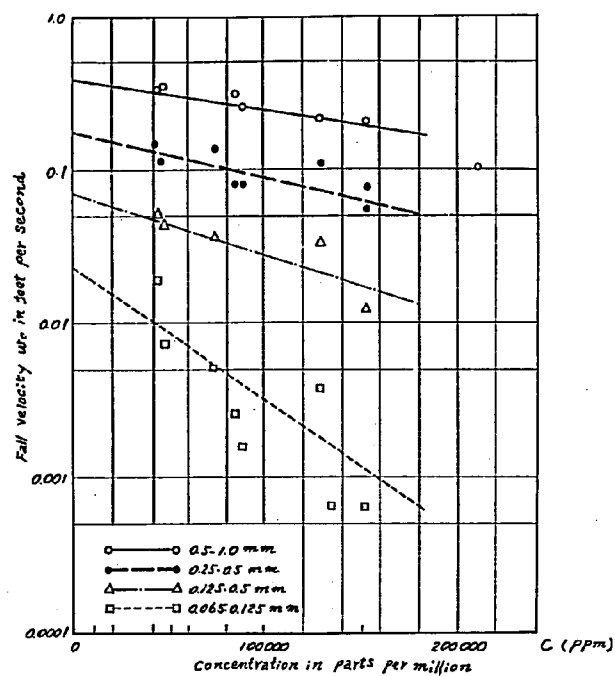


図 3-1 静水中の沈降速度と濃度の関係
(24°C) by Nordin

4. 実測値に基づく浮遊砂公式の検討

建設省技術研究会においては、洪水時の浮遊流砂量の観測を日本全国の主要河川、約20地点余において開始している^[19]。まだ、緒についたばかりで、出水まちの観測地点も多い。また、資料数も十分ではなく、測定時の流量範囲も広くはない。今後の観測結果が多いに期待されているところであるが、現在までの観測結果だけからみても、流砂関数を河川工学的な実際面から評価できる点において興味深い。自然底は河床材料粒径の混合度、乱れ、および同じ掃流力に対しても水深と勾配が実験量と大きく異なる。図4-1は浮遊流砂と河床材料の粒度分布の関係の例で浮遊砂の粒径が非常に小さいことを示している。

大きい流量時の資料は少ないがこの傾向はいずれの河川の資料についてもいえることであって、平均粒径が非常に大きい河川でも例外ではない。Einsteinは実用的見地から、河床材料中の10%以下に存在する粒径範囲をWash loadとしている。しかし、この定義にしたがうと浮遊砂の70~100%がWash loadということになる。濃度分布式にしたがうものはWash loadではないのであり、ここでは浮

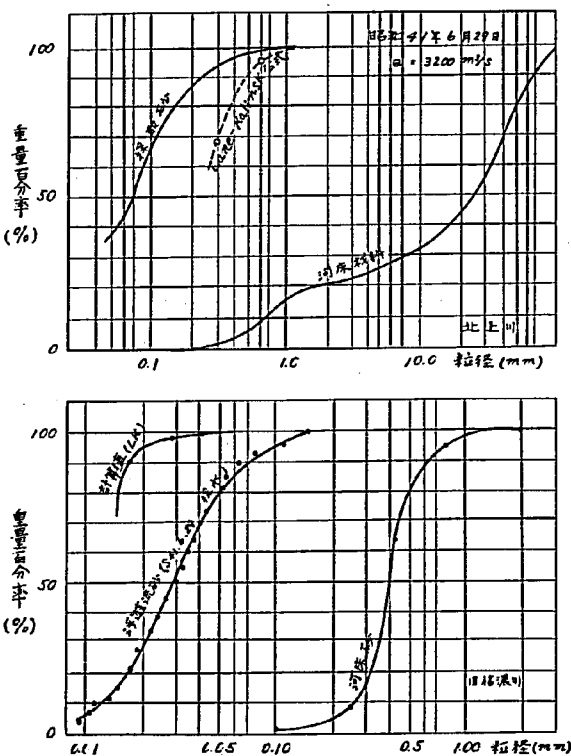


図4-1 浮遊砂と河床材料の粒度分布

遊物質の中から特に Wash load を区別しないとする利根川の例⁽²³⁾と同様の立場をとり、Wash load を含んだままの資料が解析に用いられた。

各種の流量時の浮遊砂量の実測値と Lane-Kalinske 公式、Einstein 公式あるいは Laursen 公式による計算値とが、実測の行われた河川毎に検討された。検討方針としては、各種公式を用いて粒径別の浮遊流砂量を計算するとともに、浮遊砂の各粒径毎の濃度分布や基底濃度および Wash load などの基礎的な検討を目標とした。

実測の行われた河川のうちでは、長良川、矢作川および旧信濃川などが実測時の流量範囲が比較的大きく、測定も数多く行われた。これらの河川の例で、Lane-Kalinske 公式による計算値との比較をみると、長良川の例では数倍程度の誤差で大体よい値を示しているが(図4-2)、矢作川の例では、実測値に比して計算値はかなり小さく、反対に旧信濃川の例ではかなり大きくなっている(表4-1)。

表4-1 北上川および旧信濃川の流砂量

		北上川(大曲橋)	旧信濃川(帝石橋)
q _s	実 測 値	2 5.3 7 cm ³ /s.cm	4.2 6 cm ³ /s.cm
	Lane-Kalinske 公式	1.4 4 //	1 6 0 //
	Einstein 公 式	0	
濃 度 横 断 変 化		あまりない	かなり変動がある
測 定 日		S.41.6.29減水時	S.41.6.29
流 量 / 計 画 流 量		3 2 0 0 / 6 1 0 0	9 0 0 / 2 1 0 0

全実測資料を通じて、流砂量だけについてみると、ほゞ次のことがいえるであろう。

- Lane-Kalinske 公式はなかでは実測値に近い傾向を示しているが、10倍から100倍近い誤差を生じることがある。
- Einstein 公式は、河床材料の粒径が少し大きくなると、遮蔽係数がきいて

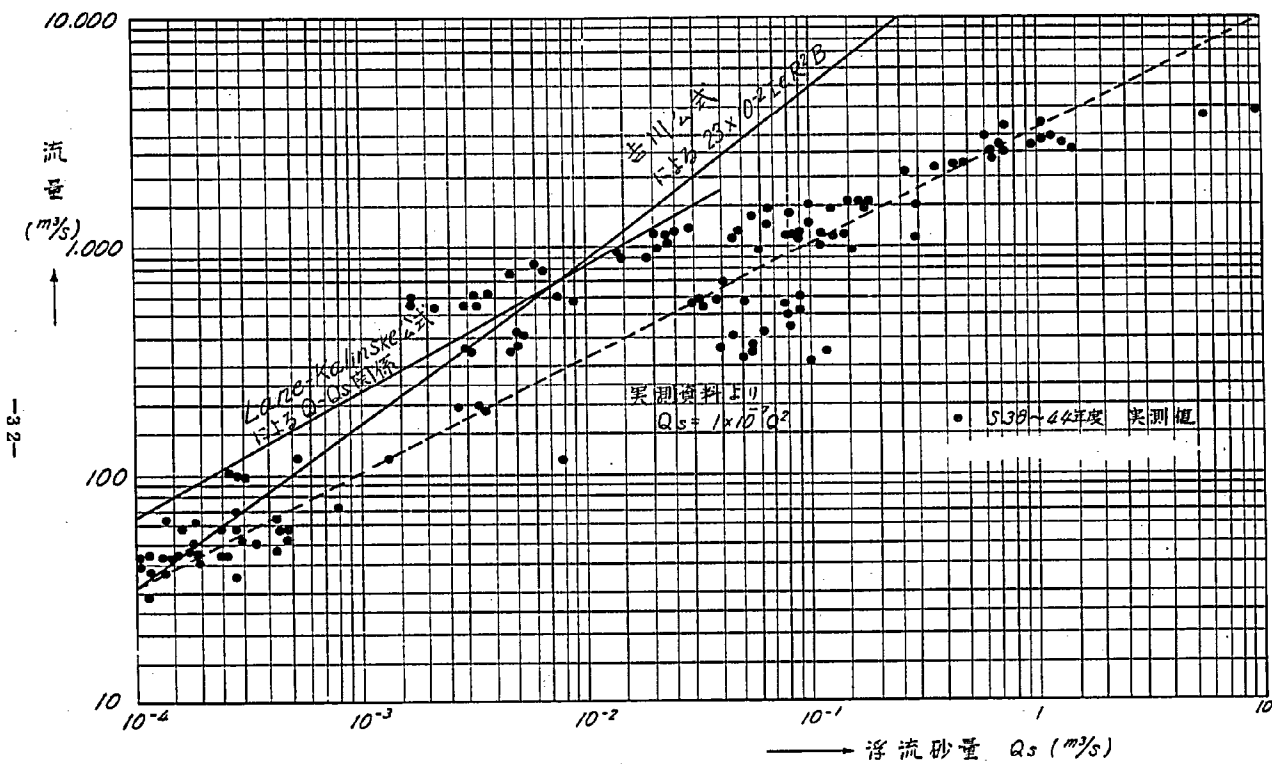


図 4 - 2 $Q \sim Q_s$ 関係 (長良川の壱俣)

きて、浮遊流砂量がゼロとなる。河床材料の粒径の混合度が大きい河川で、平均粒径がオーダー的にミリ以上の場合には、公式の適用に疑問が残されている。

- c. 修正 Einstein 公式は、やはり公式の基礎となっている河川の資料が $d_m = 0.06 \text{ mm}$ 以下であるので、河床材料の極度に細かい河川に限られるべきであろう。
- d. Laursen 式は、掃流砂を含めた全流砂量に対するものであるが、北上川の模型実験として検討された結果⁽²⁴⁾では、かなりの適合性がみられたと報告されているが、さらに数多くの実測値による検討が必要である。

次に、流砂量の物理的内容として、総流砂量のほかに、粒径別の流砂量が重要な意義を有する。図 4-1 の例は表 4-1 の流砂量測定時のもので横断面平均の浮遊砂の粒度分布を示すが、計算による粒度分布は実測のそれとかなり異っている。流砂量公式には、全流砂量と粒径別の流砂量の両方の精度が要求されているが、なかなか困難な問題といわなければならない。また、各公式で粒径別浮遊流砂量を算定するときは、細かい砂の部分をもどのように区分して計算を実施するかによっても、かなり量的に変化しそうである。旧信濃川の場合、 0.073 mm 以下の砂は全体の 1.56% に過ぎないが、これをさらに 4 つに分割して $70 \sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ までの 10 種類の流量について Lane-Kalinske 公式によって計算が行われた。その結果は表 4-2 のようである。いずれの流量ケースにおいても 90% 位の流砂量が一番小さい 0.015 mm の砂で占められ、一番大きい 0.073 mm の砂にいたっては 0.1% 余りにしかならない(表 4-3)。計算値は粒径の小さいところの区分の仕方によっても、その結果が大きく左右されそうである。ただし、阿賀野川の例においては、Lane-Kalinske 公式によって算出された粒径分布と浮遊砂の濃度分布とが実測値とかなりよい一致を示したと報告されている。いずれにせよ、河床砂の細かい粒径の砂が表面にどのように露出するかによって遮蔽効果が異ってくるものと考えられるが、現在のところ量的な把握は困難である。

芦田、道上⁽¹⁵⁾によれば、Einstein 公式は遮蔽係数、Lane-Kalinske 公式は粗度の取扱いに問題があることが実験によって指摘されているが、混合粒径の取扱いはなかなか困難な問題である。このように現在のところ各種公式においては定量的にも定性的にも疑問な点がまだ多少残されており、今後の研究に期待がよせられている。

Laursen 公式では、 U_* / W_0 の値により、すなわち、 $U_* / W_0 < 1/2$,

表-2 dのわけ方による浮遊流砂量の計算値(旧信濃川 Lane-Kalinske による公式)

d	幾何平均	P	W ₀	P _s Q _s 10 ⁻⁴ t/s.m									
				Q-70 m ³ /s	100	150	200	300	500	700	1000	1500	2000
0.107 ≧ d > 0.0504	0.073	0.314	0.4	0.26	0.73	1.59	3.35	8.02	24.7	62.5	40	452	963
0.0504 ≧ d > 0.0330	0.041	0.317	0.146	4.89	8.49	18.77	66.17	70.38	198.3	444.3	1056	2864	5741
0.0330 ≧ d > 0.0232	0.028	0.317	0.07	19.06	19.06	79.98	131.07	275.01	748.9	1630.3	3478	9916	19878
0.0232 ≧ d > 0.0096	0.015	0.499	0.02	294.10	555.39	1161.44	1863.13	3866.00	9921.1	20,587.7	4,7765	117,832	255,983
計	1.56%			318.51	601.96	1261.78	2063.72	4219.41	10,893.0	22,724.7	52,388	131,063	282,566

表 4-3 粒径別流砂量 (旧信濃川)

平均粒径 d_{mm}	0.073	0.041	0.028	0.015	計
河床材料に占める割合 p	0.00314	0.00317	0.00317	0.00499	0.0156
流砂量の割合 (計算値)	0.1%	0.9%	9%	90%	100%

$1/2 < U_* / W_0 < 2$, および $U_* / W_0 > 2$ により, 全流砂量の傾向が異っている。このような傾向は Ripple, Dune, Anti dune等の河床形状に対応するものか否かは不明である。また, 図 3-3 の基礎実験資料からみると, $U_* / W_0 > 2$ では $d < 0.145 \text{ mm}$, $1/2 < U_* / W_0 < 2$ では $d = 0.37, 0.2, 0.18 \text{ mm}$, $U_* / W_0 < 1/2$ では $d > 0.66 \text{ mm}$ となっており, 粒径による効果が現われているものか否か, 疑問な点も残されている。星畑 (口述) によれば, 沈降速度に関する, 鶴見公式の区分と対応しているようにもみえるとのことである。

5. 実用算定式

浮遊砂の問題は, 理論的にみた場合に水路底附近の流速分布や流砂の運動の細部にわたって追求するに十分でなく, 実験によっては複雑な現象を理論にのせることの容易でないことが感受され, 河川の実測によっては, ますます浮遊砂運動の複雑さを知らされるのが現状である。

すでにみてきたように, 流砂濃度分布と流速分布式から導かれる理論式は河床附近の複雑な現象の影響を受け, 不明確な要素が多く残されており, 実際の河道計画において適用するのにまだ完全な信頼をおくことがむずかしい。実用的見地からすれば, a のとり方で流砂量が大きく変化すること, および河床中に占める割合は小さくても小径砂の浮遊砂量が非常に大きくなるから Wash load との限界をどこで定めるかが重大な問題となる。また, 椿^[25]が指摘するように K の変化の影響も無視することはできなく, 理論式に K の式を代入することは複雑にするばかりであ

るから、繰り返し計算により計算値を修正することも必要である。現象的な問題としては、河床附近の砂の動き、砂れんの形成および水の流れ方に関連したものが依然として明確でない。aは河床材料の粒径dに比例させる仮定が多いが(Einsteinでは $a=2d$)、砂れんや水深にも関係がありそうである。もし、 $a=2d$ とすれば、粒径毎に掃流層厚が変化し、それにつれて U_b も変化することになる。掃流層は拡散による流砂以外の流砂がまじっている層のことで、必要なのは $y=d$ における C_a なのであるから、掃流砂の濃度分布についても検討されなければならない。また、遮蔽係数の検討の他に、河床付近の流速分布や乱れの様子は砂れんと密接な関連を有するものであり、Bishop⁽⁵⁾らの実験でも明らかのように砂れんの影響も無視することはできない。このように、浮遊砂関数は不明瞭な河床付近の水と砂の流れの影響を大きく受け、実用的には必ずしも都合の良い形となっていない。そして数多くの精度の良い実験と実河川の資料に期待するところが大きいのであるが、当面の技術の要求を満たすために、他の工夫に対する要請は大きい。

5-1 実測資料による実用公式の検討

当面の問題として、実用算定式が注目されている。実用公式としては、

$$q_s \propto h^2 I = \frac{1}{C^2 h} q^2 \quad (5-1)$$

$$Q_s \propto Q^2 / A \quad (5-2)$$

$$Q_s \propto (I/d) Q \quad (5-3)$$

$$Q_s \propto Q^n \text{ または } q_s \propto q^n \quad (5-4)$$

などの形が検討されている。ここに、 C はchezyの定数である。(5-1)式および(5-2)式は吉川⁽²⁰⁾により、また(5-3)式はLane⁽²⁶⁾により提案されたものである。

検討に用いる河川の資料は、すべてWash loadを含んだものである。図5-1は、単位巾当り浮遊流砂量 q_s と $h^2 I$ の関係をプロットしたものである。

(5-1)式の関係は図上で 45° の直線で表わされるが、点がかかなりばらついており、そのような関係が満足される資料は余りないようである。図5-2および図5-3は全浮遊流砂量 Q_s と流量 Q との関係をみたものである。図4-2の長良川の資料はふたたび図5-2にプロットしてある。点のばらつきはあるが、(5-4)式の $n \approx 2$ であり、比例定数は 10^{-7} かそれよりやや大きい程度であ

图 5-1 $h^2 I \sim q_s$

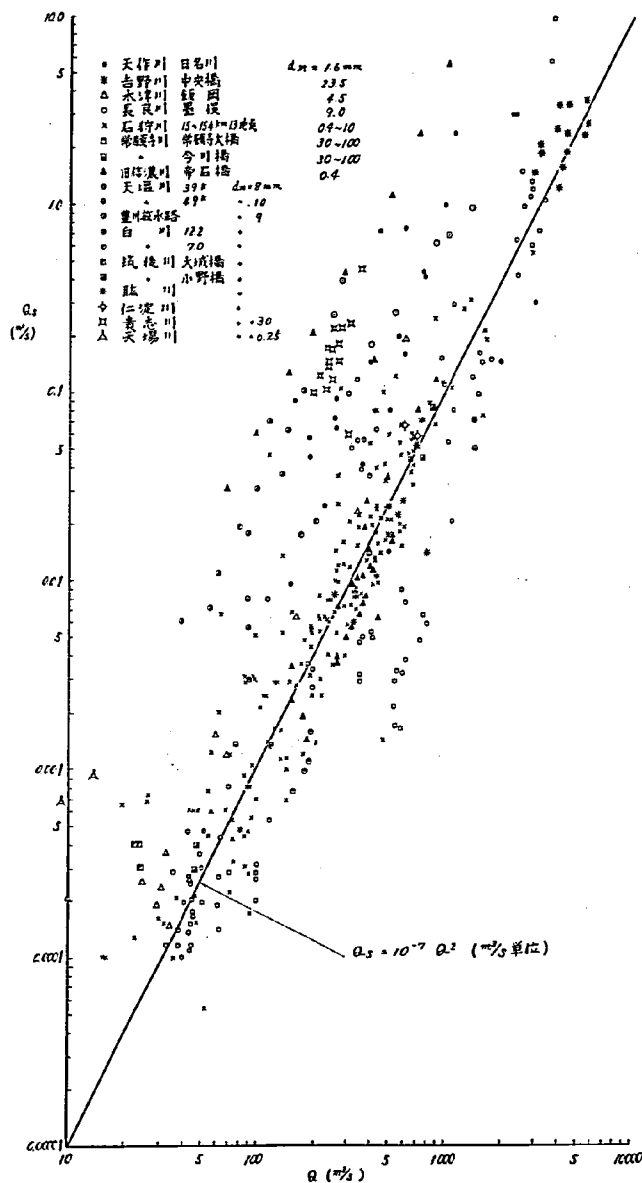


図5-2 実測浮遊砂量 (Wash loadを含む) と流量の関係 (全国資料)

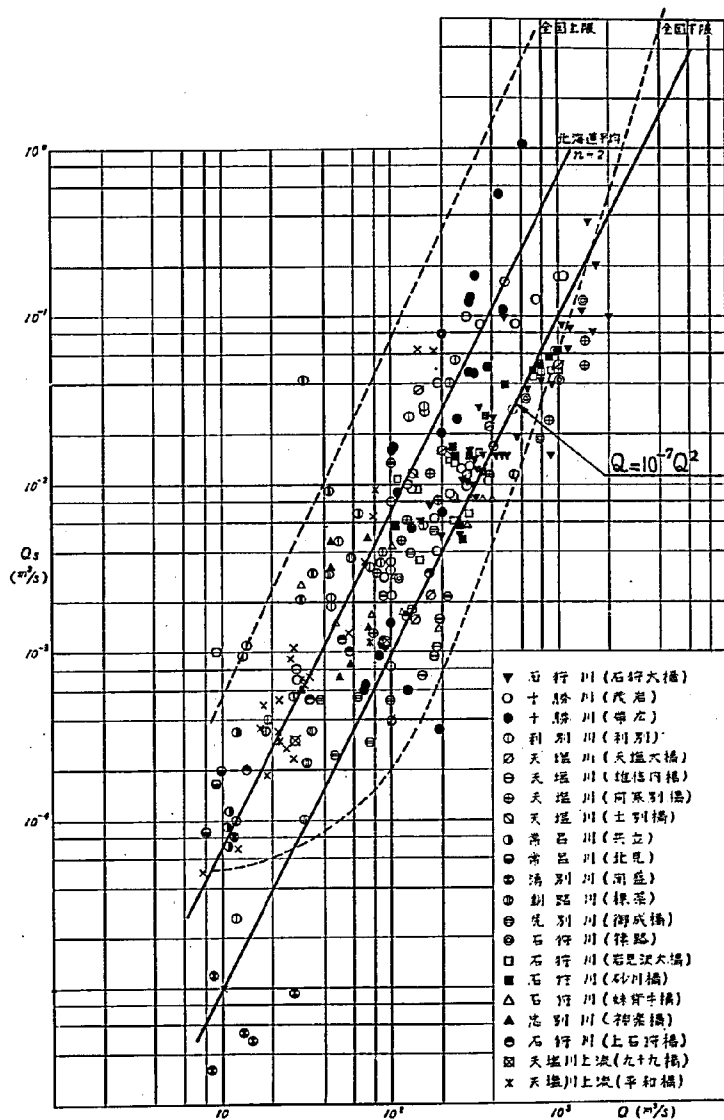


図 5 - 3 実測浮流砂量と流量の関係(北海道)

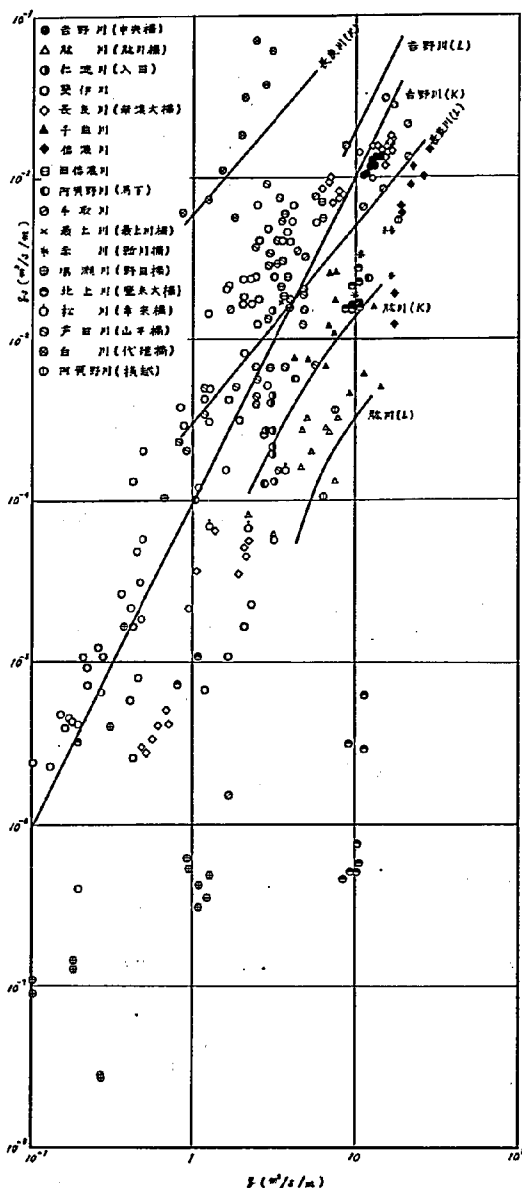


図 5-4 $q_s \sim q$ (全国河川)

る。すなわち

$$Q_s = (10^{-5} \sim 10^{-7}) Q^2$$

(m -sec 単位, 容積)
(5-5)

の関係が認められる。ここに用いられた全国河川の資料の浮遊砂は混合粒径であるが、その平均はほとんど 0.1 mm 程度以下の細かいものであって、河床材料の大きい粒径と直接の関係がないように見える。図 5-4 および図 5-5 は、単位巾当りの浮遊流砂量 q_s をみたものである。図 5-4 で、(L) および (K) はそれぞれ Laursen 公式および Lane-Kalinske 公式による計算値である。 $q_s \sim q^2$ の関係は、各河川によって係数は異なるが、大体満たされているようである。図 5-6 は Nordin⁽²²⁾ による Rio Puerco および Rio Grande 河における実測であるが同様に、 $q_s \propto q^2$ の関係が高濃度の場合もほぼ満されていることを示す。

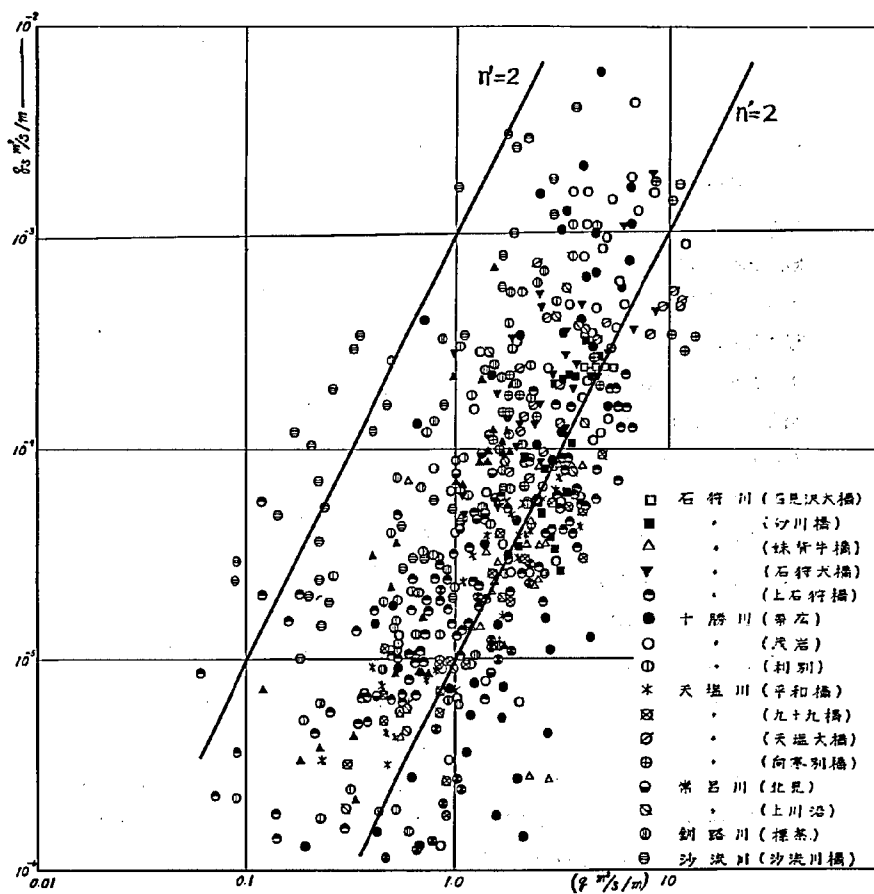


図 5-5 $q \sim q_s$ (北海道河川)

5-2 実用公式に関する

理論的考察(その1)

実用算定式で、浮遊流砂量が流量の自乗に比例するという(5-4)式の関係は河村〔27〕によれば、Lane-Kalinske 公式および Einstein 公式から、実験値等により、二、三の簡略化を行えば求めることが出来る。ただし、これはかなりばらついている点を平均した関係を用いている点や、実験値の範囲が必ずしも広範囲に渡っていないこと、そしてまた、これらの公式を用い

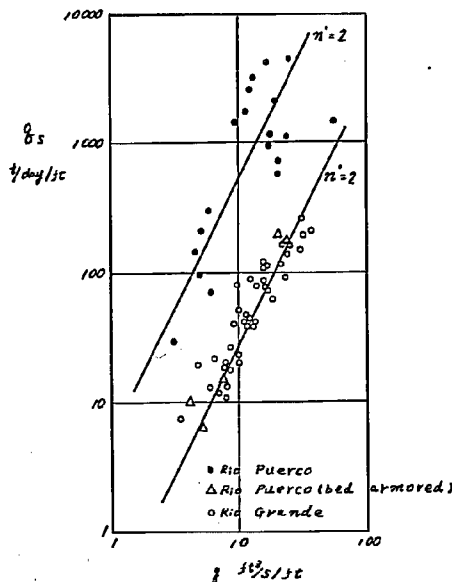


図 5-6 $q_s \sim Q$ (by Nordin)

て実際の河川の例について計算した Q_s と Q の関係が必ずしも自乗の関係にあるとは限らないなどのことにより、さらに詳細な検討が必要とされるであろう。

ここでは、極く簡単な仮定に基づいて、流れの保有しうる浮遊砂の容量の観点から考察を試みる〔28〕。実際の流砂の形態は、上流の地理および水理条件によるところもあり、流れの保有能力の検討は一つの必要条件の検討にすぎないが、実用算定公式の理論的根拠に少しでも近づくところがあれば、何らかの意義を有するものであろう。

現象を平均値で単純に扱い、近似的に $q_s = \bar{c}Q$ とする。これは、浮遊砂の粒径が小さく、濃度の鉛直分布が均一に近い時に成り立つ。建設省の技術研究会における全国河川の実測や Nordin の実測においても、細かい粒径では濃度分布は、Rouse 分布よりもむしろ均一に近いことが報告されており、0.062 mm 以下のシルトや粘土質の浮遊流砂濃度分布では、近似的に均一分布として扱うことが可

能である。ところで、平衡状態では、河床あるいは掃流層に落下する浮遊砂と同じ粒度構成で同量の砂が流れの中に巻き上げられているから、落下砂のエネルギーを無視すれば、近似的に一定速度で重力により落下する砂粒のエネルギー $(\rho_s - \rho) g h \bar{c} W_0$ に等しいエネルギーが、掃流層あるいは河床から砂を浮遊させるために流れから与えられているわけである。このエネルギーは流れの失うエネルギーの一部であるから、その割合を r ($r \ll 1$) とし、 $r \rho g q I$ とすれば、

$$\bar{c} = \frac{r I q}{\{(\rho_s / \rho) - 1\} h W_0} \quad \dots\dots\dots (5-6)$$

$$q_s = \frac{r}{(\rho_s / \rho) - 1} \cdot \frac{I}{W_0 h} q^2 \quad \dots\dots\dots (5-7)$$

$$Q_s = \frac{r}{(\rho_s / \rho) - 1} \cdot \frac{I}{W_0 A} Q^2 \quad \dots\dots\dots (5-8)$$

となる。(5-8)式は長方形、またはそれに近い断面に適用される。これらの式は吉川の式および Lane の式と比較すると興味深い。また図 5-2 や図 5-3 の実測値からも (5-8) 式の関係が各河川毎に認められるようにも思える。

(5-7)式は、 $q = h \bar{u}$ および $U_*^2 = g h I$ などの関係を用いて変形すると、

$$q_s = \frac{r}{(\rho_s / \rho) - 1} \cdot \frac{\bar{u}}{W_0} I g = F_r^2 \frac{U_*^2}{\bar{u} W_0} q \quad \dots\dots\dots (5-9)$$

のようにも表わされる。

(5-7)式の関係を、基底濃度として佐藤、吉川、芦田公式を用いた(3-4)式と比較すると、 r は、

$$r = \frac{(\varphi / \beta) F}{0.216} P \cdot \frac{U_* W_0}{\bar{u}^2} \left(\frac{\bar{u} K}{U_*} + 1 \right) I_1 + I_2 \quad \dots\dots\dots (5-10)$$

と表わされる。ここに、 I_1 および I_2 は a/h および $W_0/(k U_*)$ の関数である。

r はこの限りにおいて定数ではなく、Froude 数や粗度あるいは、 τ_{*} などの関数と考えられる。一例について、(5-9)式の関係を用いて r の変化を調べてみる。簡単のため、(5-9)式の定数をとって、

$$r' = r \frac{0.216}{(\varphi / \beta) F P} = W_0 \frac{U_*}{\bar{u}^2} \left\{ \left(\frac{\bar{u}}{U_*} K + 1 \right) I_1 + I_2 \right\} \quad \dots\dots\dots (5-11)$$

とし、 r' と d の関係を求めると図 5-7 のようである。ただし、その計算例は

$h = 4 \text{ m}$, $I = 1/2500$, 粗度係数 $n = 0.03$, $K = 0.4$ および温度 18°C のときのものである。 r' は, (5-11)式を用いた場合には, 水量一定の場合にも図5-7にみられるように, 粒径の影響を受ける。これは $a = \alpha d$ といったことによる影響もかなり入っているであろう。

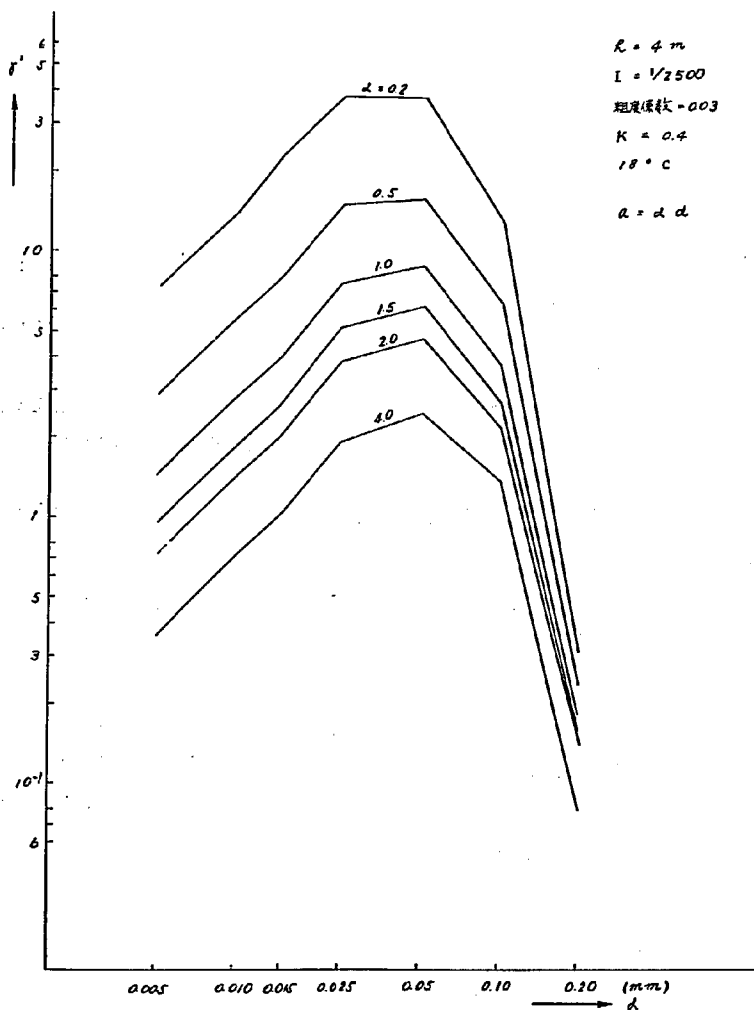


図5-7 r' の変化 ($r' \sim \alpha$, α)

このように、(5-7)式の関係は、Rouse 分布と佐藤、吉川、芦田公式を用いた理論公式から判断すると、あまりすっきりとした形にはなっていない。また、この関係を導いた仮定にもまだ問題は残されている。たとえば、落ちてくる砂のエネルギーは再び砂を持ち上げるためにも役立つであろう。そしてまた、まさつにより失われたエネルギー、浮遊砂粒を移動させるために失われる乱れのエネルギー、砂どうしの衝突やまさつにより失われるエネルギーおよび砂の掃流運搬に使われるエネルギーなど、他の運動機構により失われるエネルギーとの相互関係が明らかでない。しかし、実験や実測値でみる限り、(5-7)式の関係が全くでたらめであるとも思えないのである。

図5-8は q_s と q の関係をプロットした例である。図中の直線は $r = 0.02$ としたときの(5-7)式の関係を示す。Vanoni⁽³⁰⁾の実験資料(平均粒径0.09, 0.02および0.15 mm—混合粒径)は、かなりばらついており、この直線の範囲から多少はみ出し、 $q_s \propto q^2$ の関係にも疑問はあるが、土木研究所の実験資料(浮遊流砂の平均粒径0.11 mm, ほぼ均一)からみる限り、 $r = 0.02$ とすれば(5-7)式にはかなりの妥当性もうかがえる。Vanoniの資料(1946)は、水深が5 cm程度のものが多く、Froude 数が0.65から1.6とかなり大きい実験の資料である。Vanoniの実験結果では、 r は0.02より多少大きめになっている。一方、河川の資料では r は0.02よりもさらに小さい。また、Nordin による Rio Puerco 河の高濃度の浮遊資料は、すでに図5-6に示されている。 $q_s \propto q^2$ の関係はほぼ満たされているようであるが、 r が 10^3 のオーダーになってしまう。しかし、このことに、高濃度の場合には既述のように特別の要素が考慮されなければならないことから、あらかじめ予想されたところである。

r の値は、図5-8からも判断されるように、水理量や浮遊砂の粒径に無関係に一定とはならない。実用公式として使用する場合には、河川における実測を通じて充分なる検討が加えられたうえで適用に供されるべきであろう。(5-7)式を適用する範囲は、浮遊流砂の粒径が細かく、浮遊砂の濃度分布がほぼ一様に近い場合に限られるわけであるが、流れの勾配や水の温度による沈降速度 W_s の変化、および上流支川の影響によるWash loadの影響などにも留意しなければならない。河川の浮遊砂を考える場合には、実験の場合と、表5-1のような相違があることも r の検討にとって必要なことである。

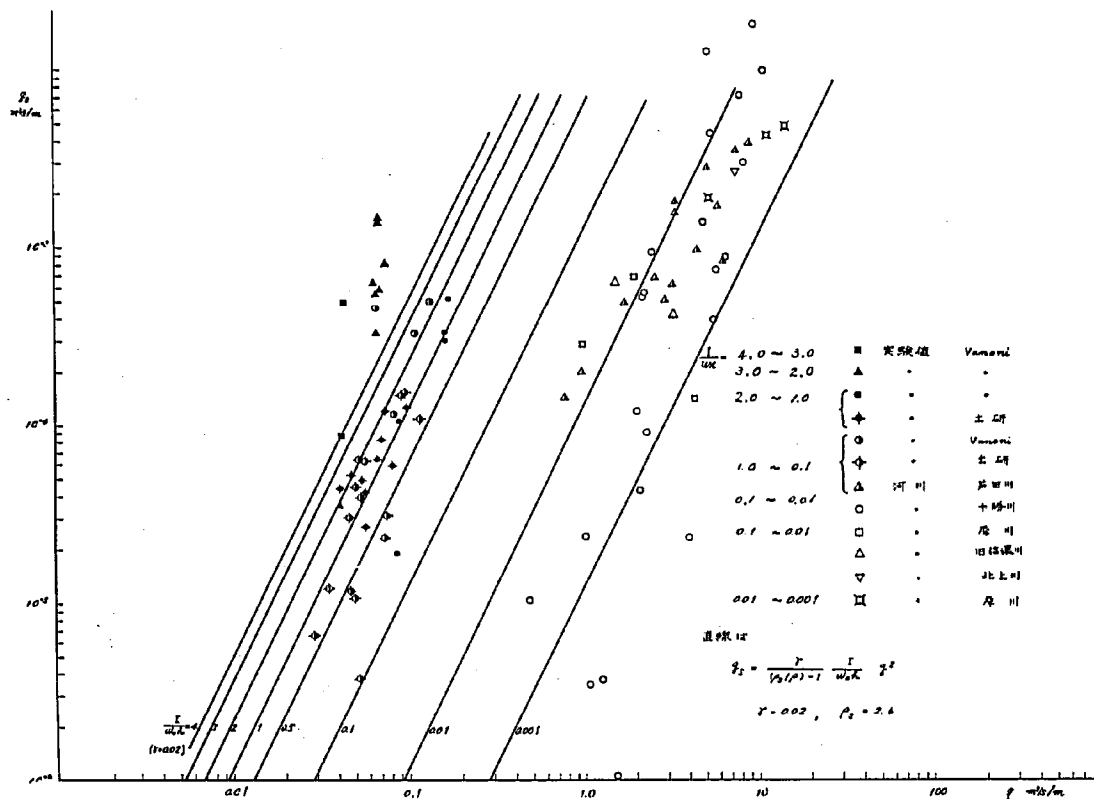


図 5-8 $q_s \sim q$ の関係

表 5-1 r の検討 (実験と実測の相違)

	実 験	実 測	備 考
浮遊砂の粒径	大	小	河川の場合, 同じ平均粒径でも細かい砂が多く q_s が大きくなる (r 大)
浮遊砂の混合度	自由 (ただし均一粒径が多い)	大	
$I / (W_0 h)$	大	I / h : 小 i / W_0 : 大	微細砂はかなり長い区間沈降しない
Wash load	小 (r : 小)	大 (r : 大)	
平 衡 度	じゅん環水路であれば平衡	非 平 衡	

r は、浮遊砂の粒径やフルード数、粗度あるいは掃流力 (たとえば $\tau_* = U_* / \{(\rho_s / \rho) - 1\} W_0\}$) などの関数であると考えられるが、現在迄のところ、この関係を見出す事は困難である。試みとして、土木研究所の資料を図 5-9 のように整理してみても、ほぼ均一粒径のものであるにも拘わらず、 F_r や τ_* による系統的な変化を見出すことはできなかった。また、Vanoni^[29] および Ismail^[30] の資料を用いて図 5-10 のように整理してみても、 F_r や $I / (W_0 h)$ による変化を見出すことは困難であった。なお、Ismail の実験資料は Vanoni と同一の砂による閉水路の実験によるものであり、ともにフルード数はかなり大きい。

ここでは、浮遊流砂の粒径が非常に細かくて、濃度分布が一定とみなせる場合を考察したが、このときには簡単に次のようにすることもできる。すなわち、

$$q_s = C_a q \propto h_i q \propto \frac{1}{c} \sqrt{\frac{I}{h}} q^2 \quad (C_a \propto U_*^2 \text{ のとき}) \dots\dots (5-12)$$

$$q_s = C_a q \propto \frac{I}{c} q^2 \quad (C_a \propto U_*^3 \text{ のとき}) \dots\dots (5-13)$$

のような関係がたどちに求められる。 $C_a \propto U_*^2$ の関係は、(3-3) 式に示されるように、浮遊砂量と掃流砂量とが連続し、たとえば掃流砂量公式として、佐藤、

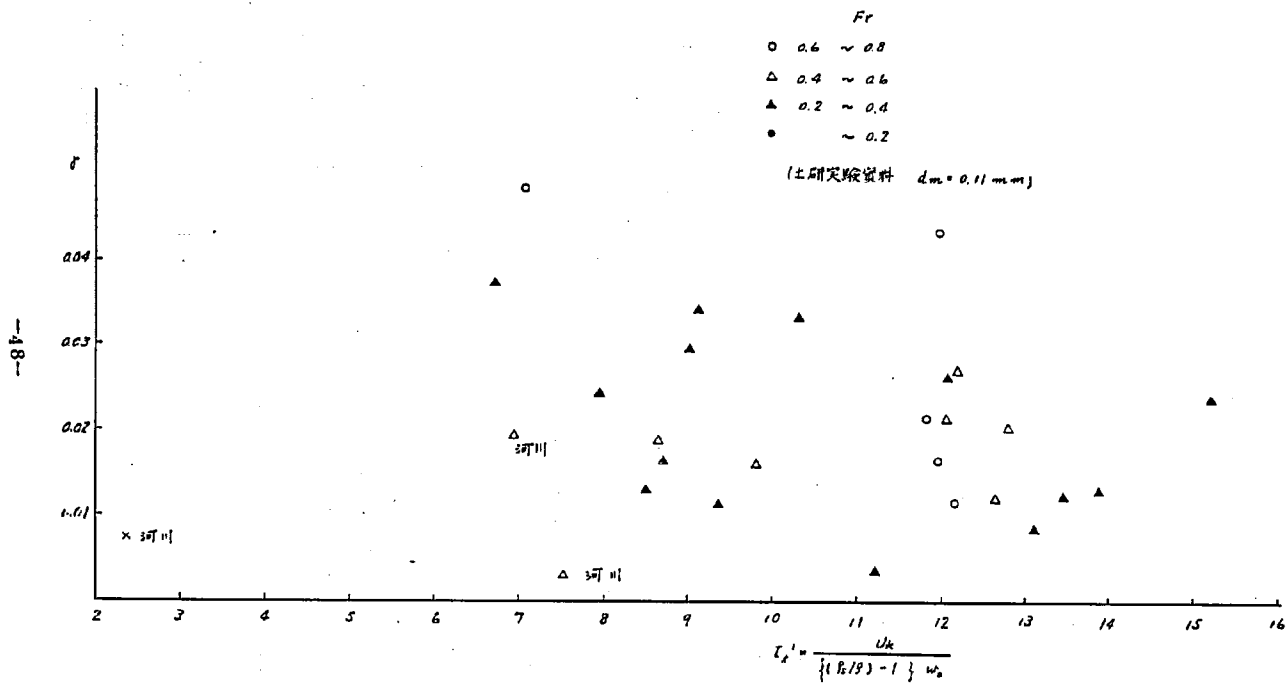


図 5 - 9 r の変化

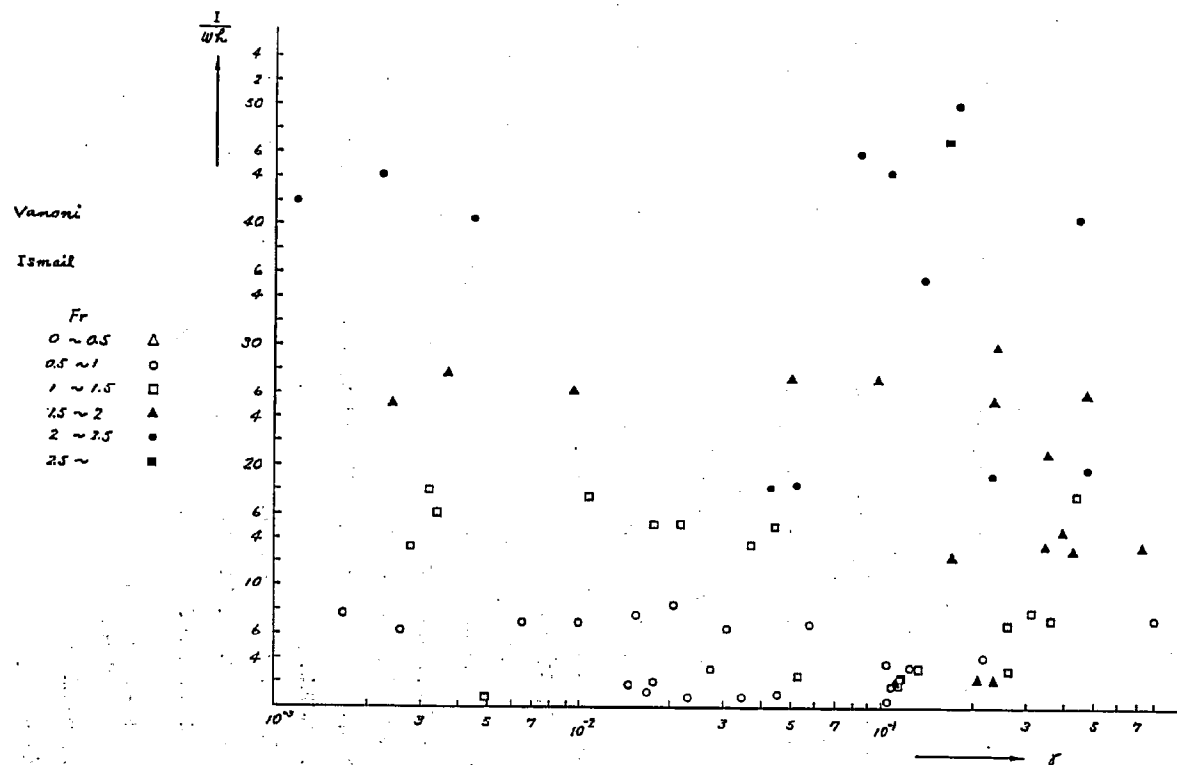


図 5-10 r の変化

吉川、芦田公式を適用した場合に得られる。(5-12)式や(5-13)式は、吉川やLaneの実用公式、あるいは(5-7)式と比較したときに興味深い関係といえよう。

5-3 実用公式に関する理論的考案(その2)

浮遊流砂量が流量の自乗に比例するという関係は、以上みてきたように浮遊流砂の粒径が非常に細かい場合に成り立つ。しかし、浮遊砂の粒径が少し大きくなると、この関係は満たされなくなる。ここでは、その様子を理論的に考察する。

簡単のため、基底濃度を与える高さ a については、Brooks にしたがって、流速分布の対数則において $u = 0$ となる点とする。このとき、浮遊流砂量 q_s は(2-9)式で与えられる。一方、基底濃度 C_a を掃流層の平均掃流濃度で与えることにし、掃流量公式として、佐藤、吉川、芦田公式を適用すれば、(2-9)式および(3-3)式から浮遊流砂量は、

$$q_s P_s = \frac{\varphi}{\rho} F B_b \frac{1}{\{(\rho_s/\rho) - 1\}} \cdot \frac{1}{\eta_0} \left(\frac{1}{\eta_0} - 1 \right)^{-Z} I \cdot F q \dots (5-14)$$

となる。ここで、 P_s および P_B は考えている粒径範囲の砂が、それぞれ浮遊および掃流中に含まれる割合、および F については $W_0/(K U_*')$ と $K U_m/U_*'$ の関数として、すでに数値計算の結果が Brooks により図 5-11 のように与えられている。この図から明らかなように、浮遊の粒径が細かいとき、すなわち $Z = W_0/(K U_*')$ が充分小さいとき(たとえば $Z \leq 0.3$ では) F は $K U_m/U_*'$ の 1.0 より小さい範囲で、それに関係なくほぼ一定とみなすことができる。このとき、 $q_s \propto C_{md} q$ となり、以前の粒径の小さいときの浮遊砂濃度一定の仮定と対比して興味深い。

図 5-12 は図 5-11 のパラメーターを変えてプロットしたものである。このグラフから、 $Z < 1.0$ では F と $K U_m/U_*'$ とがほぼ直線関係になっていることがわかる。なかでも、 $Z = 1.0$ の直線は $K U_m/U_*' > 4$ で

$$F = \frac{q_s}{q C_{md}} = \frac{1}{2} K \frac{\bar{u}}{U_*'} \dots (5-15)$$

のように表すことができそうである。この場合、浮遊流砂量 q_s は、(5-14)式より、

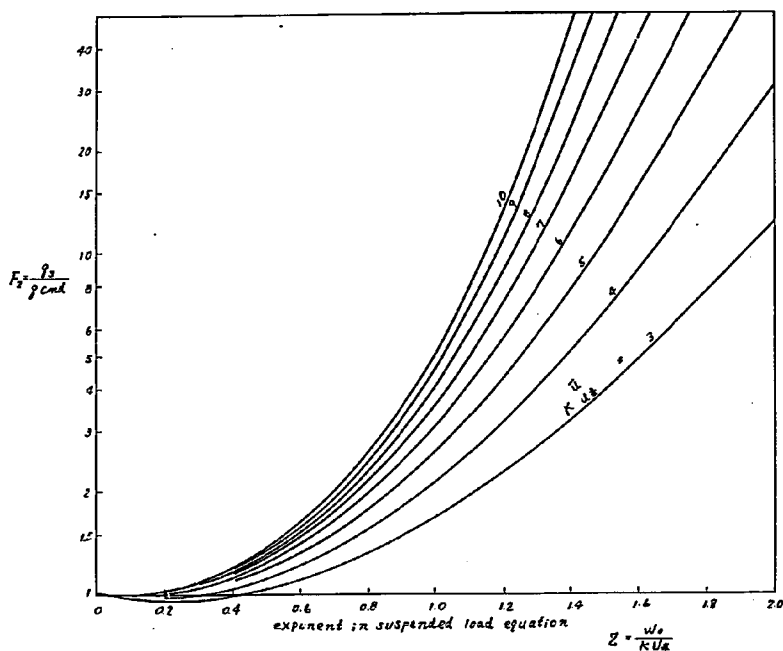


図 5-11 $F_s \sim Z, \left(k \frac{\bar{u}}{u_*} \right)$ by Brooks

$$q_s p_s = \frac{\varphi}{\beta} F P_B \frac{1}{\{(\rho_s/\rho)-1\}} \frac{1}{\eta_0} \left(\frac{1}{\eta_0} - 1 \right)^{-Z} \frac{K}{2} \frac{\bar{u}}{U_*} I \cdot q$$

..... (5-16)

である。ここで、 $\bar{u}/U_* = c'/\sqrt{g}$ および $\eta_0 = \exp(-K\bar{u}/U_* - 1)$ は、ともに粗度の関数である。洪水の減水期には勾配 I がほぼ一定であり、粗度の変化があまりなく、粒径の効果である W_0/U_* がある範囲内におさまっている場合には、(5-16) 式より、 $q_s \propto q$ が導かれる。 $Z=1$ とすると、仮りに $U_* = 0.15$ m/s で、おおよそ $d = 0.35$ mm 程度に相当する。図 5-13 は Rio Grande 河における Nordin および Beverage による実測結果である。実線は最小自乗法により引かれた線で、 S_e は標準偏差である。この地点の河床材料の粒径は

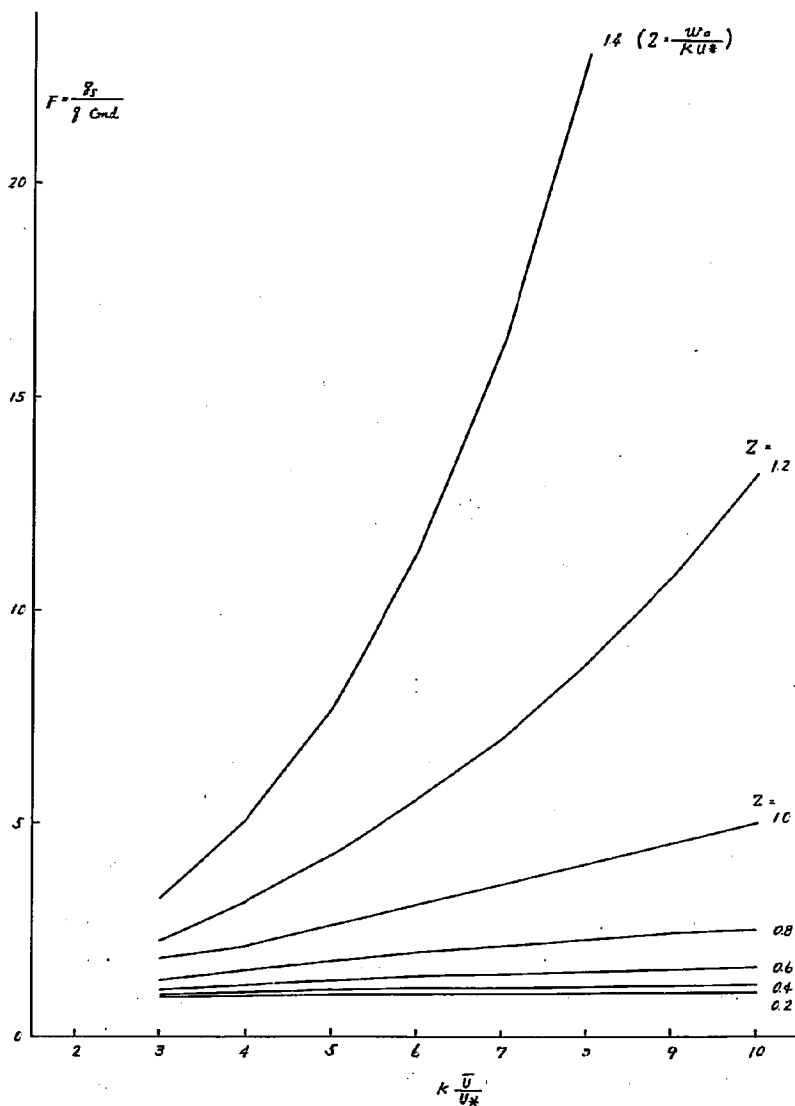


图 5-12 $F \sim k \frac{\bar{u}}{u_*}, (Z)$

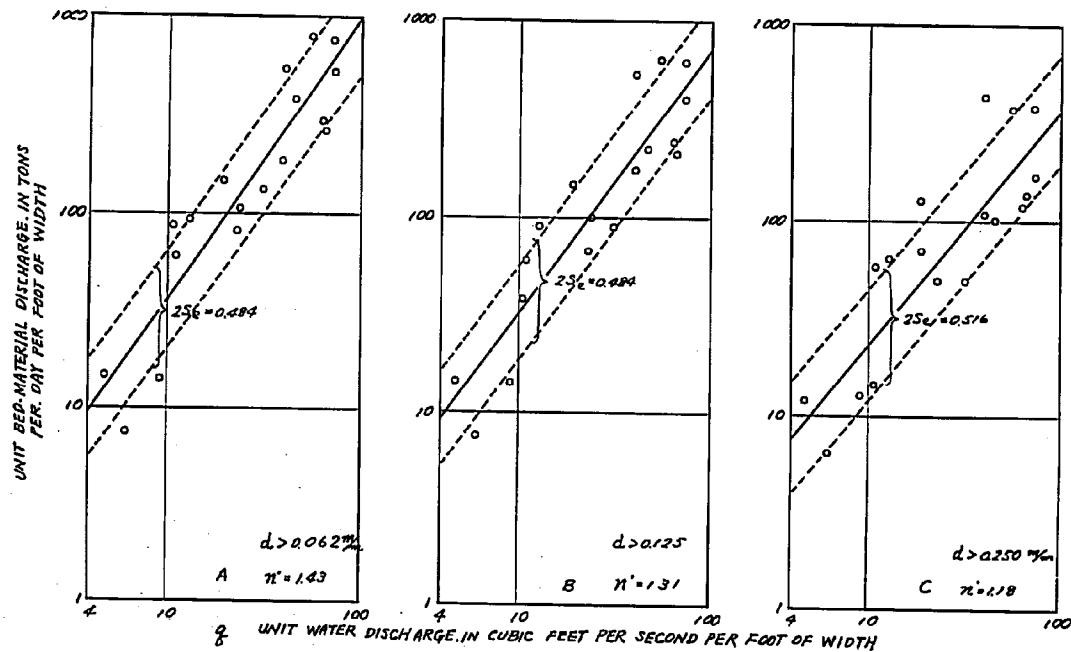


図 5-13 $q_s \sim q$ (Rio Grande河 Otowi橋地点, Nordinらによる)

0.062 mm以上で、これ以下の粒径の浮遊砂濃度は均一に分布していた。図5-13で、A、BおよびCはそれぞれ浮遊砂の粒径が0.062、0.125および0.250 mm以上のものに対する浮遊流砂量を示す。実線の勾配は、実用公式(5-4)式の関係で、 n' はそれぞれ1.43、1.31および1.18となり、粒径が大きくなるにしたがい小さくなっていることを示している。

6. 混合粒径砂に対する試み — 河床砂と基礎砂の粒度分布 —

自然界における浮遊砂現象は、一般に混合粒径の状態で行われている。浮遊濃度が非常に大きい場合には、乱流構造の変化により、たとえば沈降速度の減少⁽⁸⁾カルマン定数の減少あるいは河床せん断力の増大⁽⁹⁾などの現象がみられ、非常に複雑になるが、浮遊濃度があまり大きくない場合には重ね合せの原理が適用される。⁽⁴⁾この場合、浮遊流砂量は各粒径の浮遊砂を加え合わせて、

$$q_s = \int_0^{d_{\max}} \int_{z(d)}^h C_a(d) dz dd \quad \dots\dots\dots (6-1)$$

のように表わされる。

混合粒径砂の特性を考慮する場合、最も重要なことは、 C_a を構成する土砂の粒度分布を、浮遊砂の浮上機構との関連において如何に考えるかであろう。しかし、このような研究は、これまで、Einstein, Kalinske および佐藤、吉川、芦田らのものがあるのみで、土砂の混合特性を中心に考察したものは、まだ、量的に精度よく充分に適用に供される状態に至っていないようである。

ここでは、各粒径毎の浮遊砂濃度と基底浮遊砂において、各粒径の占める割合の問題とを切り離し、主として後者の問題について考えてみる。

浮遊基底層の浮遊流砂と河床材料の粒度分布の関係を検討する基本事項として、次のような条件、あるいは仮定を設定する。

- a. 河床上の露出砂が、必ずしも全量浮上するわけではない。限界掃流力に相当する粒径以上の動かない粒径砂、転動砂および滑動砂、それに乱れによる拡散の影響を受けない単なる Saltation 運動のみの砂などは除外しなければならない。

b. 浮上する砂は河床上の露出砂のみであるか、あるいは幾層もの砂が一度に浮上するのかは乱れの規模によるのであろう。佐藤、吉川、芦田公式によると、 $\tau_c / \tau_c > 3$ で掃流砂はほぼ河床の粒度構成を維持したまま土砂が移動する。このときには、河床面上の粒度構成と河床の粒度構成とを近似的に等しいとみなすことができる。

c. 河床面あるいは河床面上に、仮想浮遊河床砂層を考える。この層の粒度構成は、河床砂（あるいは河床面上）の粒度分布に、その粒子が乱れにより運動を始める確率を乗じたものの比に等しいとする。このとき、掃流砂との区別が明確でないが、この中から浮上するものが、浮遊砂であり、とどまるものが掃流砂の一部とということであろう。

d. 河床に存在しない細かい粒径の浮遊砂は、Wash load として流水中に均一の濃度分布の形で存在するものであるが、この部分の砂はこの場合考慮外とし、別途の取り扱いが必要とされるであろう。

e. 平衡状態では、基底浮遊砂層から仮想浮遊河床砂層へ落ちる量と浮上する量とが各粒径砂毎に等しい。

f. 浮上するときは沈降速度 W_i には無関係に、粘性底層内では仮想浮遊河床砂層の混合比が維持されるとする。また、粘性底層内に考えている基底浮遊砂層から落下する砂粒は、仮りに乱れの影響を受けずに静水中を落下する速度 W_i で沈降するものとする。沈降過程において濃度分布の影響や粒度の影響は無視する。この場合、

$$\text{浮上砂} \cdots \cdots d_i' (W_{oi}') - n_i' \text{個}, \quad P_i' = \frac{n_i'}{\sum n_i'}, \quad \sum P_i' = 1$$

$$\text{沈降砂} \cdots \cdots d_i'' (W_{oi}'') - n_i'' \text{個}, \quad P_i'' = \frac{n_i''}{\sum n_i''}, \quad \sum P_i'' = 1$$

$$P_i' = P_i''$$

である。ここに、 n_i は粒径 d_i (沈降速度 W_{oi}) の砂粒数、 P_i はその砂の占める割合である。ダッシの2つについている量は、基底浮遊砂層の量、またはダッシの一つのものは、仮想浮遊河床砂層の量とする。

g. 基底浮遊砂層と仮想浮遊河床砂層の粒度構成の関係は、Wash load を除計

して考えれば、除降速度の関係で定まるとする。すなわち、基底浮遊砂層では、仮想浮遊河床砂層に比して W_o の小さいものは多く、また W_o の大きいものは少量しかとどまりえない。平衡状態では、仮想浮遊河床砂層から P_i' の比で土砂が浮上するが、一方基底浮遊砂層からは W_o に比例した量が沈降する。基底浮遊砂層の粒径 d_i'' の砂が、 a' の距離を沈降速度 W_{oi} で落下するに要する時間は a'/W_{oi} である。ゆえに単位時間に沈降する d_i'' の砂の量の割合は、 $n_i'' W_{oi} / a'$ である。これが浮上する砂の割合 P_i' に等しい。 a' は共通であるから、

$$\frac{n_i'' W_{oi}}{\sum n_i'' W_{oi}} = P_i' = \frac{n_i'}{\sum n_i'} \quad \dots\dots\dots (6-2)$$

$$P_i' = \frac{n_i''}{\sum n_i''} = \frac{P_i'}{W_{oi}} \cdot \frac{\sum n_i'' W_{oi}}{\sum n_i''} = \frac{P_i' / W_{oi}}{\sum P_i' / W_{oi}} \quad \dots\dots\dots (6-3)$$

となる。(6-3) 式は基底浮遊砂層と仮想浮遊河床砂層の間の土砂の粒度構成の関係を与える。

以上のような考え方には、仮想浮遊河床層の粒度構成をかえないで浮上するという仮定が含まれているが、これは浮上距離や渦の大きさおよび強さなどに関係してくるものである。また、浮上現象は連続現象というよりは、むしろ間けつ現象とともくされるものであるが、平均的に考えることにし、仮想浮遊河床層と基底浮遊砂層との距離も十分小さいものであるとすれば、このような仮定があまり大きな抵抗なく受け入れられてよいと思われる。乱れの実測や数値計算などによれば、壁の表面付近では乱れは小さいが、少し離れた付近で乱れが急激に大きくなっていることが知られている。浮遊砂の現象は乱れと密接な関係を有するものである。乱れが急激に増大する層の下に、浮遊河床砂層を想定することは、まだ拡散の影響を受けていない浮遊砂の予備量を考えるということの意味する。したがって、この仮想浮遊河床砂層は、いわゆる河床とは異なるものである。河床上の大径砂とか礫とかは仮想浮遊砂層には属さない。

仮想浮遊砂層と河床砂の粒度構成の関係については、非常に困難な問題であるが、ここでは簡単に Einstein や佐藤、吉川、芦田の掃流理論の浮上機構の部分をあてはめてみることにする。

Einstein の考え方は、河床上の砂粒が動くのは、それに働く瞬間的な揚力が砂粒の重力より大きくなるときであるとするものである。これに対し、佐藤、吉川、

芦田の基本的な考え方は、乱れによる揚圧力が底粒子に与える運動量は、重力が掃流層内の砂粒子に与える運動量に等しいとおくものである。佐藤、吉川、芦田公式では、河床上の粒径の効果として、 τ_o/τ_c の関数 $F(\tau_o/\tau_c)$ および砂粒の比重 $\{(\rho_s/\rho)-1\}$ が影響することになっている。砂の比重が一定で、砂粒の限界掃流力 τ_c に比して掃流力 τ_o が十分に大きく $F=1$ のときには、掃流砂は粒径によらない。このような考え方に基づく場合、河床砂と掃流砂の粒度構成の関係は、 $F_i / \{(\rho_{si}/\rho)-1\}$ の比になっているから河床砂の粒径 d_i の占める割合を P_i とすれば、仮想浮遊河床砂の混合の割合 p_i' は、

$$P_i' = \frac{P_i F_i (\tau_o/\tau_c)}{\{(\rho_{si}/\rho)-1\}} \bigg/ \sum \frac{P_i F_i (\tau_o/\tau_c)}{\{(\rho_{si}/\rho)-1\}} \quad \dots\dots\dots (6-4)$$

である。したがって、基底浮遊砂層と河床砂との粒度構成の関係は (6-3) 式および (6-4) 式より

$$P_i'' = \frac{P_i F_i (\tau_o/\tau_c)}{W_{oi} \{(\rho_{si}/\rho)-1\}} \bigg/ \sum \frac{P_i F_i}{W_{oi} \{(\rho_{si}/\rho)-1\}} \quad \dots\dots\dots (6-5)$$

となる。砂粒の密度を一樣とみなしてよい場合には、(6-5) 式は、

$$P_i'' = \frac{P_i F_i}{W_{oi}} \bigg/ \sum \frac{P_i F_i}{W_{oi}} \quad \dots\dots\dots (6-6)$$

のようになる。

全体の浮遊流砂量の計算には、基底濃度を与える点の粒度構成を (6-6) 式で与え、たとえば Einstein, Lane-Kalinske, 佐藤、吉川、芦田、あるいは Laursen 公式などを用いればよい。一例として、佐藤、吉川、芦田公式により基底濃度を与える時は、(3-4) 式において F の代りに P_i'' を用いることにすればよい。したがって、

$$q_s = \sum q_{si} = \frac{(\varphi/\beta) p_i''}{0.216 \{(\rho_s/\rho)-1\} gk} U_*^3 \left\{ \left(\frac{\bar{u}K}{U_*} + 1 \right) I_1 + I_2 \right\} \quad \dots\dots\dots (6-7)$$

$$\text{ここに, } I_1 = 0.216 \frac{h}{a} \left(\frac{a}{h-a} \right)^2 \int_{a/h}^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^2 dy$$

$$I_2 = 0.216 \frac{h}{a} \left(\frac{a}{h-a} \right)^2 \int_{a/h}^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^2 \log_e y dy$$

である。ただし、(6-7)式では、基底浮遊砂濃度として河床から $a = \alpha d$ の層の平均値を用いているために粒径 d に反比例して基底濃度が大きくなる。Einstein式では $\alpha = 2$ としている。一方、浮遊砂量計算式の積分下限は a であるが、 a の q_s におよぼす影響は大粒径を除いてあまり大きくない。そこで積分下限は α のままとし、基底濃度を粒径に無関係に与えることとすれば

$$q_s = \sum q_{si} = \frac{(\varphi/\beta) p_i^d a/a'}{0.126 \{(\rho_s/\rho) - 1\} g K} u_*^3 \left\{ \left(\frac{\bar{u} K}{U_*} + 1 \right) I_1 + I_2 \right\} \quad \dots\dots\dots (6-8)$$

となる。(6-8)式では $a = \alpha d$ であるが、 a' は d に無関係な量として、佐藤、吉川、芦田公式によって与えられる掃流砂量が、 P_i^d の割合でそれぞれの粒径に対して浮遊砂の基底濃度を与えるとしたものである。

図6-1の粒度曲線分布は、阿賀野川横越における昭和41年の実測値と比較したものである。河床材料の平均粒径は $d_m = 0.25 \text{ mm}$ とかなり細かく、また粒度分布は均一に近い。(6-6)式による基底浮遊砂層の粒度分布の計算値は、粒径の細かい範囲で、河床上 $0.2 h$ (1.04 m) の点の粒度分布に近いが、 0.06 mm 以上の粒径の浮遊砂が観測されていないので、この範囲では計算値と実測値は離れている。これは、河床から多少離れると大きい粒径の浮遊砂が存在していないこと、また、平均の浮遊砂濃度が 480 ppm と、かなり低濃度であって Wash load のような状態に近いことのためであると考えられる。

図6-2は旧信濃川帝石橋における実測値と計算値とを比較したものである。S. 42, 8, 29 の流量は不明であるが、平均流速は 1 m/s 以下である。河床材料は細かく、Wash load の占める割合が相当大きいと考えられていたが、鉛直方向に 50 cm ビッチに採取された資料からは、水面に近づくにつれて浮遊砂の粒径が細かくなっており、浮遊砂濃度も小さくなっていることが知られた。図6-2で、一番河床に近い $h/z = 0.03$ の点は河床から 15 cm の点であるが、計算値とのずれがみられる。しかし、粒径別の濃度分布を調べると、粒径が 0.06 mm より大きい粒子は深さ方向に変化しているが、粒径が 0.06 mm より小さい粒子は深さ方向に変化せず Wash load の相当量が含まれているとみなされる。また、計算値には河床材料の細かい部分が非常に効いてくるが、非常に細かい部分の測定精度は粗い範囲のそれより劣る。旧信濃川の場合、Wash load を除いていない資料では、計算値よりかなり粒

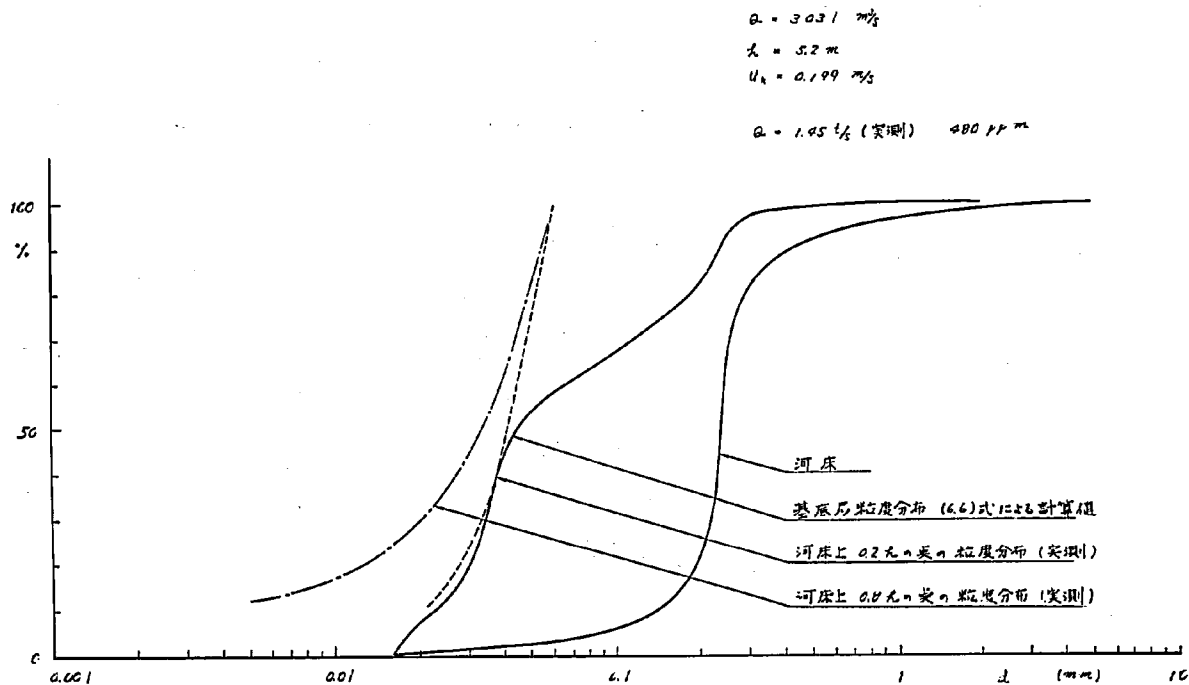


図 6-1 粒度分布曲線

阿賀野川横越 S. 41

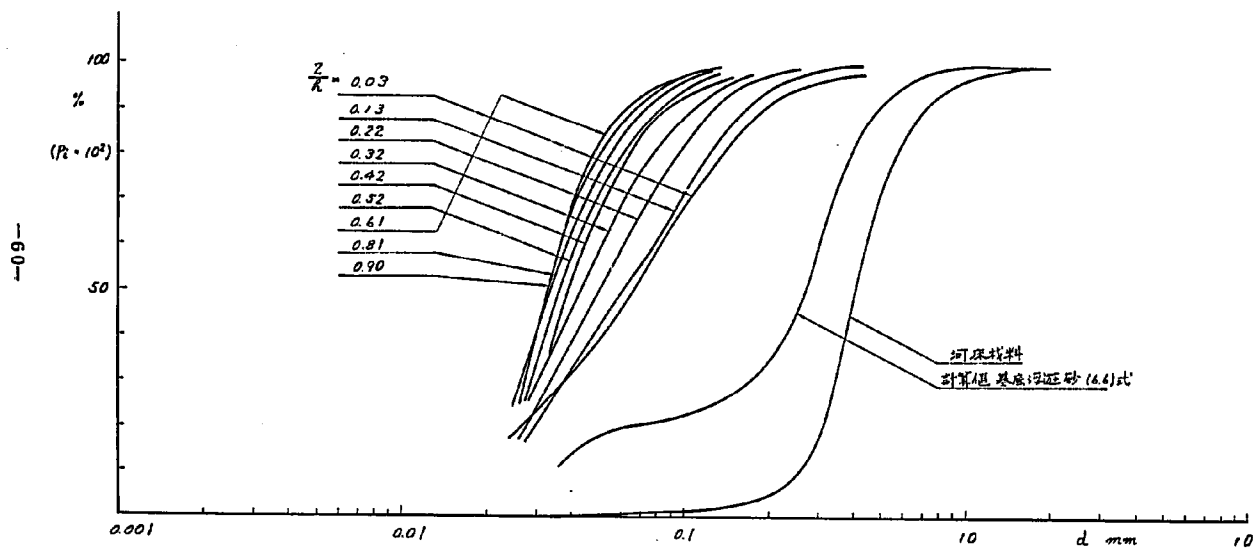


图 6-2 粒度分布曲线

旧信濃川 帝石橋 測線No 8 S. 42. 8, 29

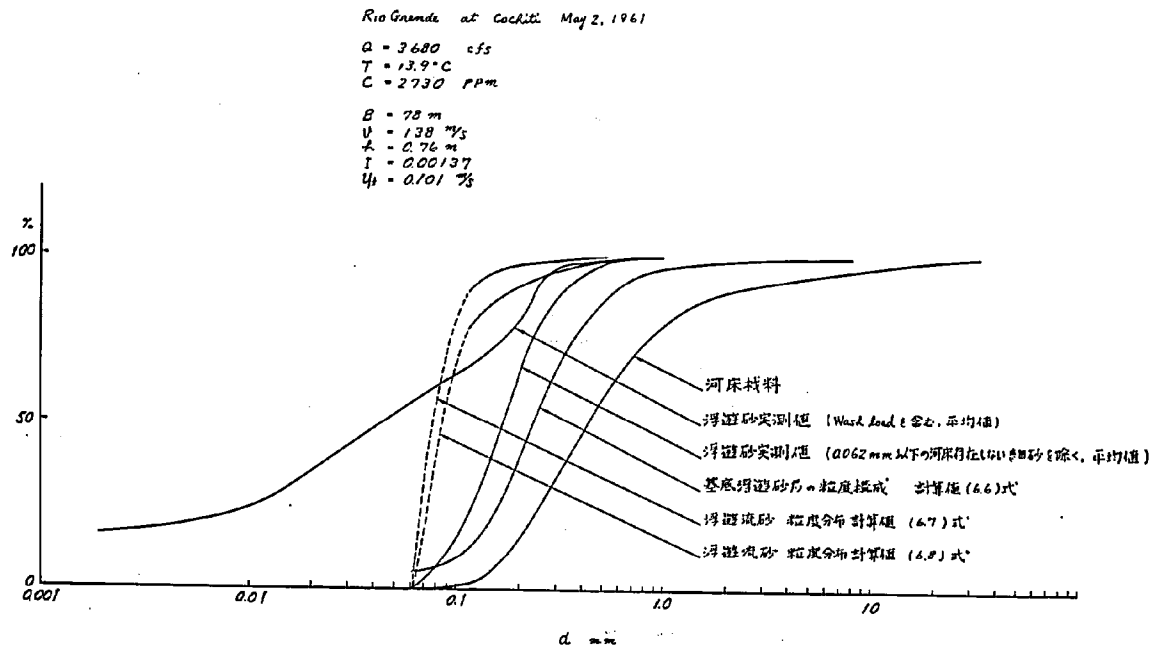


図 6-3 粒度分布曲線 Rio Grande at Co chiti May 2, 1961

Rio Grande at Otowi Bridge, July 20, 1961
by Nordin and Bevridge

$I = 0.0021$
 $R = 1.1 \text{ m}$
 $V = 0.44 \text{ m/s}$
 $U_b = 9.35 \text{ cm/s}$
 23.3°C
 $Q = 1.090 \text{ cfs}$
 $C = 3590 \text{ ppm}$

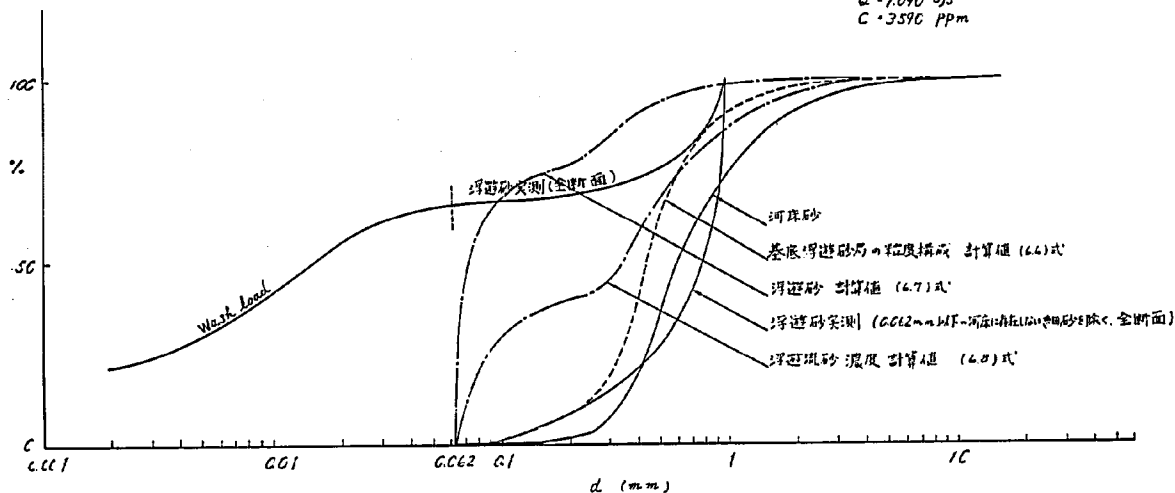


図6-4 粒度分布曲線 Rio Grande at Otowi Bridge, July 20, 1961 by Nordin and Bevridge

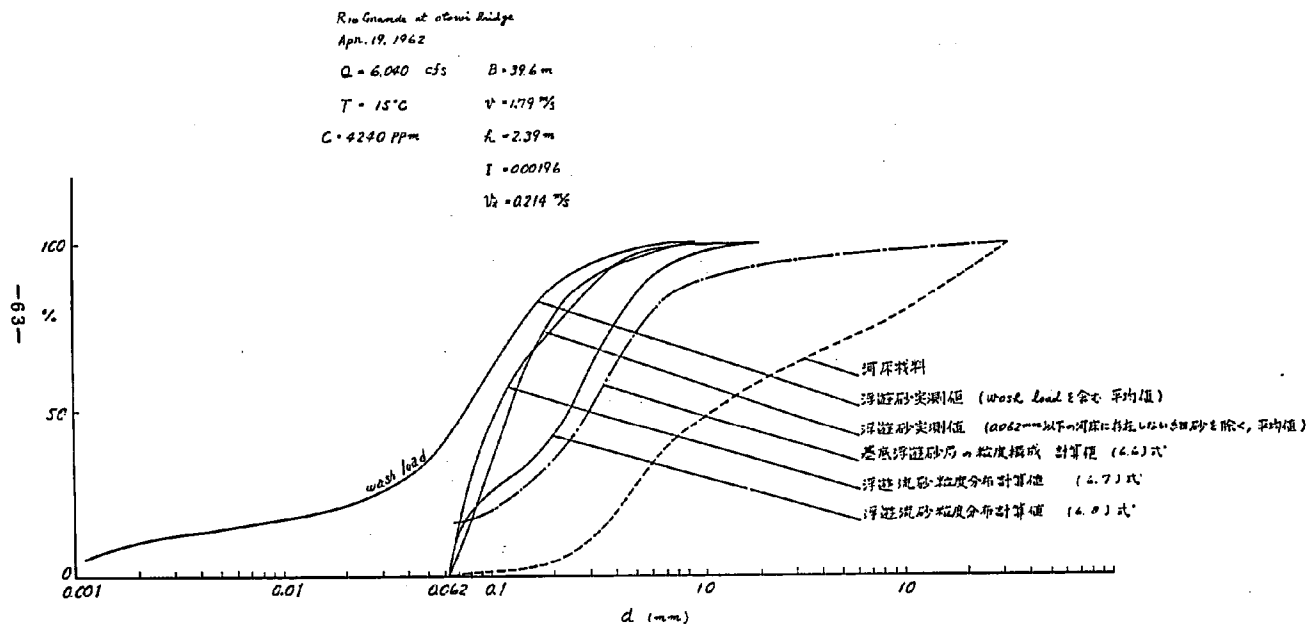


図6-5 粒度分布曲線 Rio Grande at Otowi Bridge Apr. 19, 1962

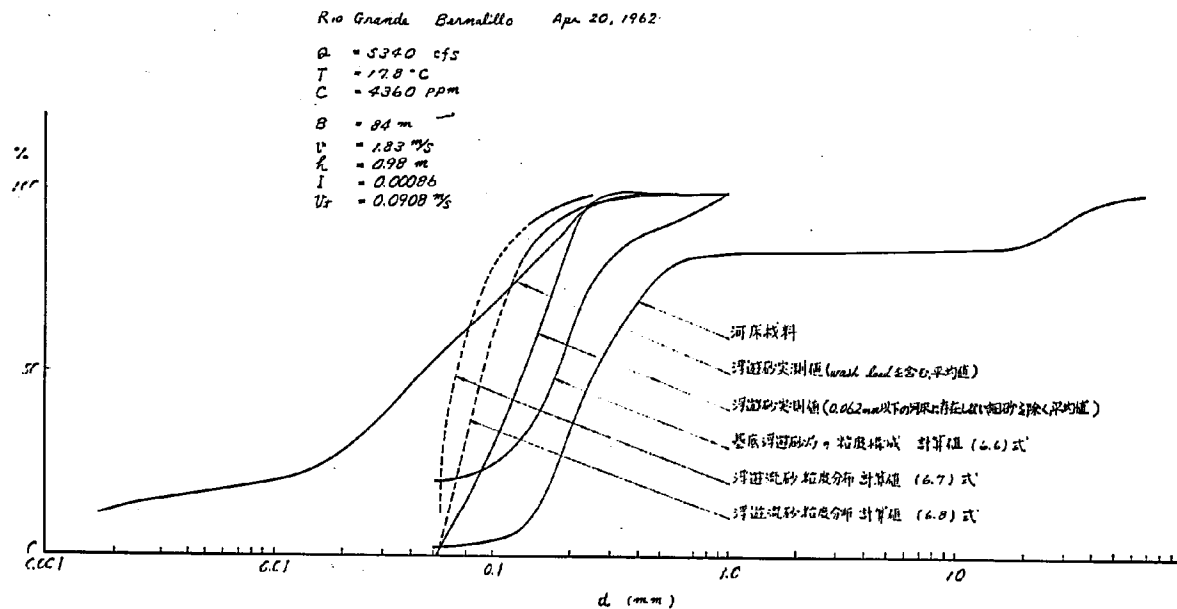


图 6-6 粒度分布曲线 Rio Grande Bernalillo Apr. 20, 1962

径が小さくなっている。

図6-3～図6-6はアメリカのRio Grande 河の実測資料^[31]について調べてみたものである。河床材料の平均粒径は $0.3 \sim 2 \text{ mm}$ 程度であるが、細かいところで 0.062 mm 、大きいところで $16 \sim 64 \text{ mm}$ とかなり広い範囲にわたる混合粒径となっている。河の規模はむしろ小さいが、浮遊砂濃度は $3000 \sim 4000 \text{ ppm}$ であって低濃度ではない。浮遊砂の粒度分布は、河床砂のそれに比してかなり細かく、相当量のWash loadが含まれていると考えられる。そこで、 0.062 mm 以下の細かい砂粒は河床に存在しないから、簡単のため、仮りに 0.062 mm 以下の粒径のものをWash loadと考え、 0.062 mm より大きい砂について考慮してみることにした。いずれの場合にも 0.062 mm 以下の浮遊砂(Wash load)は半分程度含まれているが、残りの浮遊砂の粒度分布は、それぞれ図6-3～図6-6に示されているようにかなり河床材料のそれに近づいてくる。河床材料の粒度構成に基づいて(6-6)式により算出された基底浮遊砂層の粒度分布はOtowi Bridgeにおける実測値を除いていずれの場合も河床砂と 0.062 mm 以上の浮遊砂の粒度分布の中間に位置している。Otowi Bridgeの実測値(1961)では、 0.062 mm から 0.5 mm までの浮遊砂がほとんど観測されていないため、計算された基底浮遊砂層の粒度分布が 0.062 mm 以上の浮遊砂のそれより小さくなっているばかりか、 0.062 mm 以上の浮遊砂の平均粒径が河床砂の平均粒径より大きいという結果になっている。これは、流量の最も小さい場合で、平均流速も 1 m/s 以下であるが、その原因は不明である。図6-3～図6-6には(6-7)式および(6-8)式より算出した浮遊流砂の濃度分布曲線が同時に示されているが、 0.062 mm 以上の浮遊砂実測値に比して、Oochiti(1961)、Otowi Bridge(1961)、およびBernalillo(1962)で細かすぎ、Otowi Bridge(1962)の場合では多少粗くなっている。このようなばらつきの原因としては次のような事項が考えられる。

- a. 河床材料そのものではなく、基底浮遊砂層というものを考え、その層の粒度分布を与えた、この理論の考え方にまだ問題が残されている。
- b. Wash load が大量に含まれており、Wash load の分離が完全でない。
河床に存在しないとされる 0.062 mm 以下を除く根拠があいまいである。
- c. (6-7)式あるいは(6-8)式を用いて浮遊流砂量を計算する場合には、

特に細かい粒径の範囲で浮遊流砂量が非常に大きくなり、細かい範囲の粒径の区切り方、代表径のとり方によっても浮遊流砂量の計算値がかなり左右される。

- d. 浮遊流砂量公式で粒径に無関係とした ρ に問題がある。
- e. 浮遊砂の実測の採水点の位置が不明であり、必ずしも平均の浮遊砂を表わしていないおそれがある。Depth Integral Method としても河床付近の浮遊砂をとることが容易でない。大きい粒径の浮遊砂は河床付近にしか存在しない。
- f. 粒径の細かい範囲の測定精度は粗いものに比しておちる。特に河床材料の細かい範囲の測定精度が問題となる。河床表面の移動層の河床材料と採取したものが同一であるかどうか、また水中から河床材料を引き上げる方法が完全であるかどうかにも問題が残されているよう。

g. その他

このように、種々の問題点が考えられる。そして、浮遊砂の粒度分布は河床砂から直接算出するこれまでの計算法の方が会うのではないかというような議論も出てこよう。しかし、河床砂と浮遊砂の粒度分布は、一般に大きく離れているのが普通であり、浮遊砂の粒度分布も水面から河床に下がるにつれて大きくなっている事実からは、基底浮遊砂層というもの存在に、ある程度の妥当性を見出すこともできよう。浮遊砂の実測値は、鉛直方向に細かく採水して検討されたものがあまり存在しないので、基底付近の精密な観測が望まれるところである。

7. お わ り に

近年、河川における浮遊流砂量の実測が数多く行われるようになってきた。非常に困難な作業であるので、河川水量の範囲、精度、鉛直方向の測定の数および粒度分布の解析などに、今後大いに期待されているところも多いが、これまでの実測を通じて、浮遊砂現象の輪郭を把握するうえに大変役立っていることは評価さるべきであろうと思われる。

ここでは、建設省技術研究会およびGeological Surveyの実測値の一部、および二・三の実験値に基づいて、河川における実際の浮遊砂現象をなるべく物理的に考察する立場より、これまでの研究の紹介と二・三の検討が行われた。あえて焦点を絞ることがなされておらず、また著者のメモ書きが寄せ集められたに過ぎないものであって、はなはだ不十分なものであるが、明らかにされた事項および問題点をとりまとめればおおよそ次のようである。

- a 通常用いられている浮遊砂濃度分布の Rouse 式および流速分布の対数則は、ともに河床付近において、それぞれ十 $\sim$ 、一 $\sim$ となり、河床付近がキポイントである浮遊砂関数の立場からは不都合であることは周知の通りである。浮遊砂関数の精度を向上させるうえで最も重要なことは粒径別の基底濃度 $O_a(d)$ およびその高さ a を合理的に決定することであろう。
- b 浮遊流砂の基底濃度を掃流砂との接続関係において論ずる場合、掃流砂の Contact load (転動, 滑動) を分離する必要がある。また、砂れんの影響や河床付近の代表流速 U_b についての十分な知識が浮遊砂量関数の精度を向上させることになる。
- c 基底濃度を与える高さ a については、河床付近の流速分布および濃度分布に関する詳細な検討を必要とするが、物理的現象の十分な解明が遅れている限りにおいて、Brooksが提唱するところの指数則における $u = 0$ の点をあてる方法は、浮遊流砂量の最大値を与え、かつ関係量の一つ減らし、一つの図表によって計算可能となるのでその優位性が認められる。
- d 河川の浮遊流砂量を流量との関係で整理する方法はよく行われている。浮遊流砂が細かく、ほとんど wash load と考えられる場合には $Q_s \propto Q^2$ の関係が認められ、理論的にもその裏付けが可能である。しかし、河床材料との交換が行われる浮遊流

砂量は、水位～流量の関係と同様に一般にループを描くと考えられる。また、日本の河川のように変化の激しい河川では、一般に飽和度についても十分な検討が必要であろう。

- e 日本の河川では、高濃度の浮遊流は観測されていないが、細かい粒子が混入すると異様な高濃度となることが知られる。この原因はせん断力の増大、あるいは沈降速度の減少ともいわれているが、パイプ輸送などの実際上の問題としても興味深い。
- f 各種浮遊流量公式による計算値と河川における実測値との比較ではかなりの差があることが多い。小径砂の区分の仕方なども問題となるようである。
- g 実用算定公式は、Wash loadを含めた全浮遊流砂量に基づいて作られている場合が多い。河口における浮遊砂の排出量の算定などには役立つであろう。浮遊砂による河床変動を論ずる場合には、粒径別の算定式に発展させることが必要であろう。
- h 浮遊流砂が細かく、ほぼ均一分布と考えるときには、実用算定公式の関数形について、エネルギーの関係をういて理論的な考案がなされた。
- i 浮遊流砂が細かい時には、 $q_s \approx q^2$ であるが、粒径が粗くなるに従い、指数が、減少する。その様子は浮遊流砂量の理論曲線 (Brooks) から近似的に求めることができる。また Rio Grande 河において、粒径の 0.062, 0.125 および 0.25 mm 以上の浮遊砂に対して指数がそれぞれ 1.43, 1.31 および 1.18 と減少していることが観測されている。
- j 基底浮遊砂層の粒度分布について考察が行われた。これは、河床との交換に、河床の極く近傍においては沈降速度が重要な役割を果たすとの仮定に基づくもので、実測値によってもこの考え方に対するある程度の妥当性が認められた。
- k その他、浮遊砂関数については、なお多くの基礎的な問題が山積している。それらを列挙すれば、内容の重複するものもあるがおおよそ次のようである。
 - (1) 浮遊流砂濃度(c)による乱流構造の変化 (K, ϵ_x , W_0 , 河床付近の流速分布, 粒径効果, 密度勾配の効果, 温度)
 - (2) 粒径毎の重ね合わせ (小粒径砂の影響)
 - (3) 粒径別の基底濃度 $O_a(d)$
 - (4) 基底濃度の高さ a
 - (5) Wash load の分離

(6) 掃流砂量との接続関係

(7) 河床形状の影響

(8) 3次元流の影響（河床付近の渦、大規模渦、曲線水路）

(9) 不飽和（洗堀過程、沈降過程）

付 録 I 記 号 一 覧 表

A	横断面積
a	河床から基底濃度を与える点までの高さ (粒径の関数)
a'	" " (粒径に無関係)
c	浮遊砂濃度
$\bar{c}$	平均浮遊砂濃度
Ca	基底濃度
C_{mid}	$Z = h/2$ における浮遊砂濃度
Co	河床における浮遊砂濃度
C'	chezy の定数
d	土砂の粒径
d_{50}	50%粒径
d_{max}	粒径の最大値
d_i'	仮想浮遊河床砂の粒径 (浮上砂)
d_i''	基底浮遊砂層の粒径 (沈降砂)
F_1	関数 (2.6) 式
F_2	関数 (2.9) 式および図 5-11
Fr	Froude 数
$F(\tau_0/\tau_0)$	佐藤, 吉川, 芦田公式において図が与えられている
f	Laursen 公式における係数, U_* / W_0 の関数, 図 3-4
g	重力加速度
h	水深
I	エネルギー勾配
I_1	Einstein 公式において図が与えられている。
I_2	" "
m	流速分布の指数 (7.10) 式
M	定数
n	Manning の粗度係数, または定数 (5.4) 式
n'	定数 (5.4) 式

ni'	仮想浮遊河床砂から浮上する d_i の粒径砂の個数
ni''	基底浮遊砂層から沈降する d_i'' の粒径砂の個数
P	$h^{1/6}/(n\sqrt{g})$ および Wo/u_* の関数, (2.17) 式
p	粒径 d の砂が河床砂において占める割合
p'	" 浮上砂 "
p''	" 沈降砂 "
p_B	" 掃流砂 "
p_s	" 浮遊砂 "
Q	水路全体の流量
Q_s	" の浮遊流砂量
q	単位巾当りの流量
q_B	" の掃流砂量
q_s	" の浮遊流砂量
q_s'	" の浮遊砂に係する量 (3.4) 式
Se	標準偏差
u	流速
$\bar{u}$	平均流速
u_b	掃流層内の平均流速
u_*	まさつ速度 $\sqrt{ghI}$
U	表面流速
Wo	土砂の沈降速度
z	河床からの鉛直距離
Z	$Wo/(KU_*)$
α	a/d ($a = \alpha d$)
α'	$Wo h / \epsilon_x$
β	U_b / U_*
r	浮遊させるに必要なエネルギーの割合
r'	(5.11) 式
A	砂れんの高さ
ϵ	運動量の渦動粘性係数

- ϵ 運動量の渦動粘性係数の平均値, (2.14)式
 ϵ_x 渦動拡散係数
 η z/h
 η_0 a/h
 K カルマン定数
 ρ 密度
 ρ_s 砂の密度
 τ_0 掃流力 (河床せん断力)
 τ_0' " を表わす量, (3.6)式
 τ_c 砂の限界掃流力
 τ_e 有効掃流力
 τ_e^* " の無次元量, $\tau_e / \{(\rho_s - \rho)gd\}$
 φ 佐藤, 吉川, 芦田公式における係数 (粗度の関数)
 φ' U/U_*
 φ_0' (3.7)式

付 録 Ⅱ 参 考 文 献

- (1) Einstein, H.A. ; The Bed Load Function for Sediment
Transportation in Open Channel Flows. Tech. Bulletin No. 1026.
U.S. Dept of Agriculture. Soil Conservation Service, 1950
- (2) Lane, Kalinske ; Engineering Calculations of Suspended
Sediment, Trans. AGU, Vol. 22, 1941
- (3) Laursen, E.M. ; The Total Sediment Load of Streams, ASCE
Hy. 1, 1958
- (4) 芦田, 道上 ; 浮遊流砂を伴う場合の河床変動について, 第 10 回水理講演会,
1966
- (5) Bishop, Simons and Richardson; Total Bed Material Transport,
ASCE Hy. 2, 1965
- (6) Lane, Carlson and Hanson; Low Temperature Increases Sediment,
Transportation in Colorado River, Civil Engineering, ASCE,
Sept, 1949
- (7) Brice, J.C. ; Channel Patterns and Terraces of the Loup Rivers
in Nebraska, US Geological Survey, Professional Paper
422-D, 1964
- (8) Nordin, C.F. ; A Preliminary Study of Sediment Transport
Parameters, Rio Puerco Near Bernardo, New Mexico, US
Geological Survey, Professional Paper 462-C, 1963
- (9) 吉川, 福岡 ; Hydraulic Roles of Wash Load, 土木学会論文集 155号
1968
- (10) 土屋, 星畑, 仲道 ; 浮遊砂運動のシミュレーション, 土木学会年次講演会
1969
- (11) Norman H. Brooks ; Laboratory Studies of the Mechanism of
Streams Flowing over a Movable Bed of Fine Sand, Ph.D.
dissertation, California Institute of Technology 1954
- (12) Norman H. Brooks ; Calculation of Suspended Load Discharge

- from Velocity and Concentration Parameters, Proc. of the
Federal Inter-Agency Sedimentation Conference 1963
- [13] Chang, Simons and Richardson ; Total Bed -Material Discharge
in Alluvial Channels, US Geological Survey Water Supply
Paper 1498-1
- [14] 土屋・星畑 ; 浮遊による河床変動 土木学会水理講演会 1969, 2
- [15] 芦田・道上 ; 浮遊流砂を伴う場合の河床変動について, 土木学会水理講演会,
1966. 2
- [16] Guy, Simons and Richardson ; Summary of Alluvial channel
Data From Flume Experiments, 1956~61, US Geological
Survey Professional Paper 462-1, 1966
- [17] 山口, 高橋 ; 河口砂州の崩壊について(その2)
土木学会年次講演会 1968.11
- [18] Shinohara and Tsubaki ; Rep. Res. Inst. for Appl. Mech.
Kyūshū Univ. Vol. VII, No 25, 1959
- [19] 建設省土木研究所(土屋, 須賀, 星畑) ; 河床変動に関する研究, 第19~
第23回建設省技術研究発表会, 1965.11 ~ 1969.11
- [20] 吉川 ; 浮遊流砂量に関する二・三の考察, 土木研究所報告83号 1952.3
- [21] 吉川 ; 洪水時の河川浮遊流砂量の変化について, 土木研究所報告87号
1954
- [22] Nordin, G.F. ; Study of Channel Erosion and Sediment
Transport, ASCE, Hy. 4, 1964
- [23] 佐藤・吉川・芦田 ; 河川の土砂流送に関する研究, 土木研究所報告101号,
1955.8
- [24] 石崎・本間 ; 北上大堰に関する水理検討, 土木研究所資料460号, 1969.3
- [25] 椿 ; 流砂, 土木学会水工夏期講習会, 1966.8
- [26] Lane, E.W. ; The Importance of Fluvial Morphology in
Hydraulic Engineering, Proc. ASCE, Vol. 81, 1955
- [27] 河村 ; 支配流量の一計算法, 土木学会水理講演会 1968.2
- [28] 須賀 ; 浮遊流砂に関する雑考, 土木学会年次講演会 1967.5

- (29) Vanoni ; Transportation of Suspended Sediment by Water,
Trans. ASCE, 1946
- (30) Ismail ; Turbulent Transfer Mechanism and Suspended
Sediment in Closed Channels, Trans. ASCE, 1952
- (31) Nordin, Beverage ; Sediment Transport in Rio Grande,
New Mexico, Geological Survey Professional Paper 462-F,
1965