

浮遊現象に及ぼす粒度組成の影響に関する実験

岩 垣 雄 一・土 屋 義 人・矢野洋一郎

SOME EXPERIMENTS ON THE INFLUENCE OF SINE FREQUENCY DISTRIBUTIONS OF SEDIMENTS ON THEIR SUSPENSION

By Yuichi IWAGAKI, Yoshito TSUCHIYA and Yoichiro YANO

Synopsis

Some experiments on the influence of size frequency distributions of sediments on their suspension in water have been carried out by using a small water tank having several oscillating holed plates like as used by H. Rouse in 1939. The purpose of the experiments is to clarify whether the method of superposition such as Einstein's one to estimate the concentration of graded sediments in suspension is applicable or not in a turbulence field.

After some experiments for uniform particles to verify the uniformity of the turbulence field in the tank and the uniqueness of the suspension phenomena, the distributions of sediment concentrations of graded sediment in suspension and size frequency distributions of suspended loads have been measured in various cases. It is concluded from the comparison between the calculated distributions of sediment concentrations and the experimental results, and from the experimental results of coefficients of eddy viscosity that the method of superposition is not applicable in turbulence fields; therefore, the mechanics of suspension of graded sediments should be established in connection with turbulence spectra.

1. 緒 言

河川および海岸における諸現象を取り扱う場合には、一般に土砂流送の問題が重要になってくる。従来よりこの土砂流送の問題については、実験および実測の結果にもとづいて多くの研究がなされてきたが、いうまでもなく自然の流路や海浜を構成している砂礫は、混合砂礫 (graded sediments) であるために、水流による土砂粒子の運動はきわめて複雑であって、流送土砂量の推定などにおいては、多くの問題点を残している。この研究においてとりあげる浮遊現象もその代表的なものの1つであって、浮遊土砂の流送機構とか波の作用による土砂の浮遊機構と関連するものである。

流水による土砂の浮遊現象は、あるスペクトル特性をもつ乱れの場合における土砂粒子の拡散現象であるから、浮遊現象に及ぼす土砂の粒度組成の影響を検討する場合には、乱れの場合と粒度との相互のスペクトル特性にもとづいて考察すべきである。

一方、水工学上の実際問題、たとえば混合土砂の浮遊土砂量を推定する場合には、これまで Einstein の方法のように、各粒径ごとの浮遊土砂量とそれが河床砂中に含まれる割合との積を総和するという方法で行なわれてきたが、はたしてそのような重ね合わせの方法が、一般に成立するかどうかは非常に疑問である。したがって、われわれは浮遊現象に及ぼす粒度組成の影響を検討する第1歩として、前述した重ね合わせの方法の妥当性を実験的に検討することにした。その場合、乱れの場合として、水工学上の実際問題、たとえば開水路水流や波の作用による土砂の浮遊機構を取り扱うにさきだって、1939年 Rouse²⁾ が行なったと同

様な、いちおう様な乱れの間が作り出される実験水槽を用いて実験を行なった。前述したように、こうした現象を追求するには、乱れのスペクトル特性を明らかにすべきであるが、水槽内につくった乱れの間を計測する適当な方法が考えられなかったので、主として水工学上の実際問題との関連から、浮遊濃度分布の重ね合わせの検討に主眼をおき、この現象を実験的に考察して問題点を明らかにすることにつとめた。

2. 実験装置および実験方法

(1) **実験装置** 実験水槽は直径および深さとも 50 cm の鋼製円筒状水槽であって、その側面の一部は合成樹脂板でつくられ、内部の様子がみられるようになっている。水槽内には中心間隔 1 cm, 直径 0.6 cm の円孔を全面にあげた円板を適当な間隔に数枚とりつけ、それらを同時に上下運動させることによって、乱れの間をつくるようになっている。その上下運動の振幅は最大 5 cm で任意に変えることができるようになっており、周期は 0.5 sec, 1.0 sec および 2.0 sec である。また、水槽の側面より中心に向かって、内径 0.6 cm の採水管が深さ方向に 2 cm の間隔でとりつけられている。なお、以下の実験においては、上下運動をさせる攪乱板は、5 cm の間隔でとりつけ、最下端の攪乱板と水槽の底面との最短距離は 3 cm とした。

(2) **実験に用いた粒子の特性** この実験に用いた粒子は合成樹脂の粉末であって、その比重は 1.273 であり、また形状は Photo. 1 に示すように、比較的球形に近いものである。この粉末を 0.011 cm および 0.015 cm と 0.040 cm および 0.060 cm のフルイでそれぞれフルイ分けしたものを一様粒子とし、また混合粒子は中央粒径が 0.015 cm, 標準偏差 $(d_{84}/d_{16})^{1/2}$ が 1.21, 1.47, 1.99 および 2.56 で、その分布が対数正規分布にしたがうように、0.0075 cm, 0.011 cm, 0.015 cm, 0.025 cm, 0.030 cm, 0.040 cm および 0.06 cm のフルイでフルイ分けした粒子を混合してつくった。

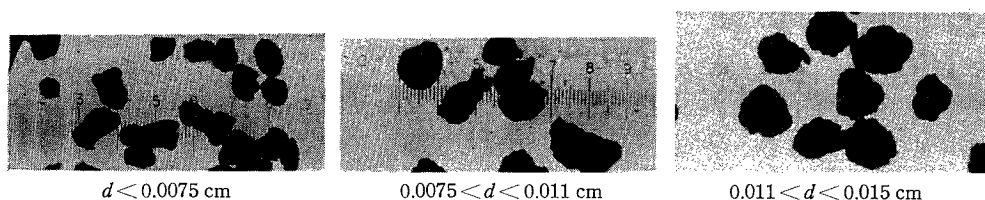


Photo. 1 Microscopic photographs of plastic particles used.

(3) **実験方法** まず一様粒子を用い、種々の振幅および周期における浮遊粒子濃度を測定して、後述するような方法によって、実験水槽内における乱れの一様性を確かめた。この場合、採水管によって浮遊粒子を採集する場合には、採水管の先端を水槽の側面から中心に向かって半径の 1/2 の点におき、つぎの点に注意して行なった。1) 採水管内の流速は粒子が途中で沈殿しない程度で、できる限り小さくした。2) 合成樹脂粉末は澆水性が強いため、その水中投入にあたっては、微量の中性洗剤を用いたが、これによる水の粘性の変化はほとんど問題にならないと考えられたので、水温の測定から動粘性係数の値を推定した。3) 浮遊現象の定常性については、実験開始より 15 min, 30 min, 45 min, 60 min および 75 min 後に採水し、その濃度分布の変化を検討したところ、15 min 後にはすでにほぼ定常状態に達していることがわかったので、すべての実験は実験開始後 30 min ないし 45 min に採水することにした。

つぎに、混合粒子の場合には各混合粒子をある一定量水槽内に入れておいてから、実験を始めたが、そのほかこうした浮遊現象の一意性とくに実験開始の条件によって浮遊粒子濃度や浮遊粒子の粒度組成が相違するかどうか検討した。なお、浮遊粒子の粒度組成はフルイ分析によった。

3. 実験結果とその考察

(1) **実験装置の特性** 現象が定常で平均流が存在しない場合、乱れの作用によって輸送される浮遊物質

の量は $\overline{u_i L_j}(\partial c / \partial x_j)$ であって、これが沈降速度による輸送量 $w_0(\partial c / \partial x_j)$ に等しいとしてえられる。

$$\overline{u_i L_j}(\partial c / \partial x_j) = w_0(\partial c / \partial x_j) \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

が、浮遊物質の連続方程式である。ここに、 c ：浮遊物質の濃度、 u_i ：変動速度、 L_j ：ある定義にもとづく混合距離、 w_0 ：沈降速度、である。(1)式において、

$$\varepsilon_{ij} = -\overline{u_i L_j} \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

であらわされる ε_{ij} は渦動拡散係数であって、一般には2次のテンソルであり、厳密には一様な乱れの場合であっても、非等方性であるならば、 $\overline{u_i L_j}$ は i および j に関しては対称ではない³⁾。したがって、われわれがこの実験において、一様な乱れの場合といているのは、つぎのような意味であるとしよう。すなわち、(1)式を鉛直 z 方向にのみ濃度分布が存在し、他の x および y 方向には一様であるとして、積分した

$$\varepsilon_z(dc/dz) + w_0 c = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

において、 $\varepsilon_z = \text{const.}$ の場合である。いいかえれば、(3)式において、 ε_z が一定であれば、 $\log c$ と z とは直線的な関係であらわされるから、そのような乱れの場合における浮遊現象に及ぼす粒度組成の影響を検討することにする。したがって、 w_0 が同一すなわち一様粒子の場合には、確実に(3)式の関係が成立しているかどうか、実験装置の機能を確認する必要がある、さらにまたこのような ε_z に対する制約は、混合粒子の場合にも成立するものと仮定することにしよう。なお、以上のことから、以後(3)式中の ε_z を ε_0 とかくことにする。

さて、Fig. 1 は一様粒子を用いた場合の濃度分布を示したものであるが、これからいずれの場合にも、確実に(3)式の関係が成立していることがわかる。図中の記号は、 z ：底面からの距離、 h ：水深ですべての実験に対して 39.5 cm、 w_0 ：沈降速度であって、実験に用いた粒子は十分小さく、かつ比重も小さいので、Stokes の法則から求めることにした。

つぎに、Fig. 1 に示した結果にもとづいて、この実験における乱れの特性をあらわす無次元量 $w_0 h / \varepsilon_0$ と実験装置の機能特性との関係を次元解析的に考察した結果が Fig. 2 である。ここに、 S ：攪乱板の振幅、 T ：周期、 ν ：水の動粘性係数、 g ：重力の加速度、である。なお、0.040 cm～0.060 cm の粒子を用いた場合にも同じ結果がえられたが、とくに S 、 T および ν が一定であれば、 ε_0 の値は粒子の大きさによって変化

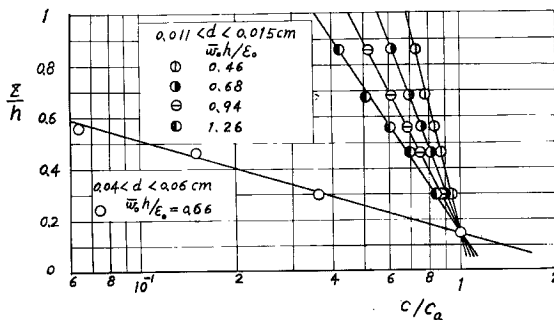


Fig. 1 Some examples of distributions of sediment concentration for uniform particles.

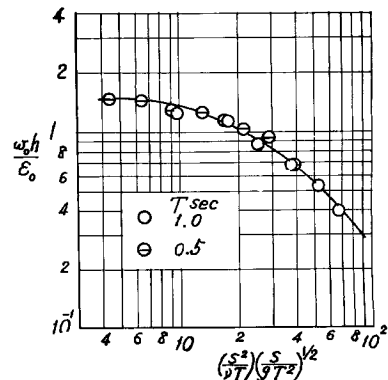


Fig. 2 Relation between characters of turbulence field and experimental apparatus used, for particle sizes of 0.011 cm～0.015 cm.

しないことがわかった。

(2) 実験における現象の再現性および一意性 まずこうした浮遊現象に関する実験における精度について検討するために、同一方法および条件のもとに実験を行なって、濃度分布および浮遊粒子の特性を実証的に確かめたところ、かなりの精度を確保しうることがわかり、現象の再現性を確認することができた。

つぎに、粒子の実験水槽内への投入方法による現象の相違、すなわち平衡状態における浮遊現象の一意性について検討した結果について述べよう。Fig. 3 は前述した一定量の混合粒子を、実験開始後上から投入した場合と、あらかじめ実験水槽に入れておいて実験を開始した場合とについて、それぞれ $z/h=0.15$ の点における濃度の比 $(c_u/c_l)_{z/h=0.15}$ と混合粒子の標準偏差 $\sigma_b = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$ との関係を示したものである。ここに、 w_0 は混合粒子の中央粒径に対応する沈降速度である。この結果によれば、両者の比の値は σ_b とともに一般に増加する傾向を示し、とくに $w_0 h/\varepsilon_0$ の値が大きい場合に顕著であるが、反対に小さい場合にはほとんど1に近く、 $w_0 h/\varepsilon_0$ の大きさに密接に関係することがわかる。以上の事実は $w_0 h/\varepsilon_0$ の値が大きく

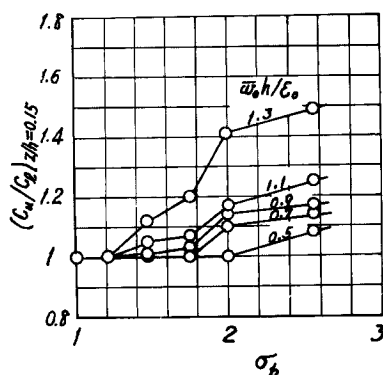


Fig. 3 Relation between ratio of concentration at $z/h=0.15$ when sediments are supplied from water surface after start of experiment to that when sediments are settled on bed before experiment $(c_u/c_l)_{z/h=0.15}$ and standard deviation of sediments σ_b .

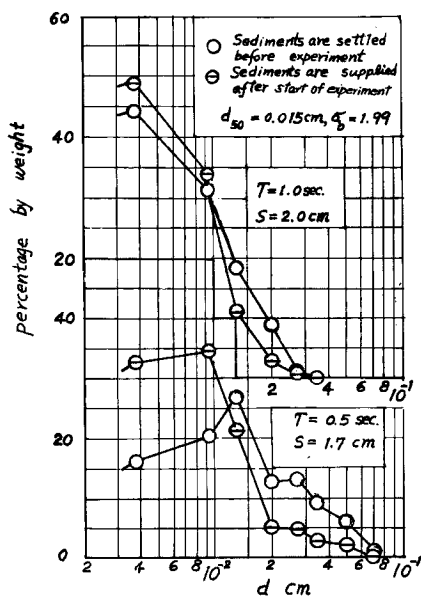


Fig. 4 Size frequency distribution of sediment at $z/h=0.15$.

なると、現象の一意性は確保されないことを示しているが、このことはつぎのような理由にもとづくものと考えられる。すなわち、(2) 式によって定義される渦動粘性係数は、この場合の乱れの大きさを表現する 1 つの尺度とも考えられるが、一般には u_i は当然あるスペクトルをもっている。しかしながら、いま簡単に考えることにすれば、 ε_{ij} すなわち ε_0 の値が大きければ u_i の平均値も大きいとしてよいから、そうした乱れの場における浮遊限界粒子の大きさは ε_0 とともに大きくなると考えてよいであろう。一方、ばらつきの大きい粒度分布をもつ混合粒子の場合には、与えられた乱れの場において、浮遊限界に近い粒子がかなり存在するものと考えられる。したがって、あらかじめ実験水槽内に混合粒子を投入しておいて実験した場合には、底面付近の乱れに対応した浮遊限界以上の粒子が、浮遊可能な粒子の浮き上りをさまたげるだろうと考えられる。このことは乱れの場が同一であれば、 σ_b の値が大きい場合の粒子ほど顕著であろう。したがって、Fig. 3 に示したように、 w_0h/ε_0 の値が大きくなると、 $(c_u/c_l)_{z/h=0.15}$ は σ_b とともに増加するものと考えられるが、さらに適確な説明は前述したように、乱れのスペクトル特性と粒度分布との関連にもとづかなければならない。

なお、Fig. 4 に示した結果は、 $z/h=0.15$ の点における浮遊粒子の粒度分布であるが、粒径の大きい部分では上から投入した場合より、あらかじめ水槽内へ入れておいた場合の方が大きくなっているのに反し、粒径の細かい部分では反対の傾向を示しており、このことは前述した説明と関連して興味ある事実である。

(3) 混合粒子の濃度分布特性 Fig. 5 は w_0h/ε_0 の値を一定とし、混合粒子と一様粒子の濃度分布を比較したものであり、また Fig. 6 は混合粒子の濃度分布に及ぼす w_0h/ε_0 の効果を示した結果の一例である。図中 c_a はある基準点における濃度をあらわし、ここでは $z=0.15h$ の値である。これらの結果によれば、一様粒子の場合と相違して、混合粒子の濃度分布は Fig. 5 および 6 のような図示において直線とならず、一般にわん曲することがわかる。そして、そのわん曲の程度は粒度分布によって単純には変化しないようであるが、混合粒子が同一であれば、 w_0h/ε_0 の値が小さくなるほど、したがって乱れの強さが大きくなるほど、当然濃度分布は一様になる傾向を示す。以上のことから、混合粒子の浮遊濃度分布を(3)式にもとづいて、ある 1 つの代表粒径であらわすということは、一般には不可能であることがわかる。

つぎに、混合粒子中の各粒径ごとの濃度分布について検討しよう。Fig. 7 は $\sigma_b=1.75$ の混合粒子の場合の一例であるが、これからつぎのことがわかる。まず、こうした表示による濃度分布の直線性であるが、粒径の小さい粒子の場合は十分直線性を示すが、粒径が大きくなると極端にわん曲する。そして、粒径の小さい粒子の濃度分布から、一様粒子の場合と同様に ε_0 の値を求めると、Fig. 8 のようになると、たとえ濃度分布が直線的関係であらわされても、 ε_0 の値は決して一定値とならず、粒子の大きさとともに非常に変

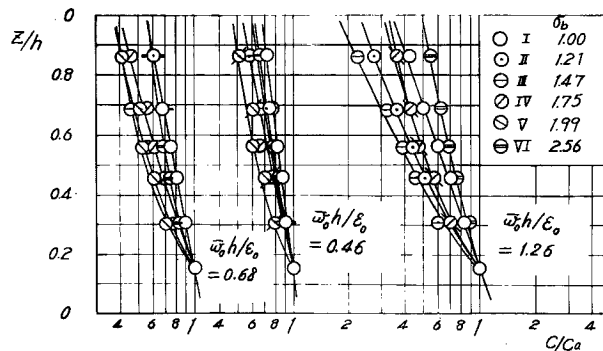


Fig. 5 Some examples of distributions of concentration for graded sediments (2).

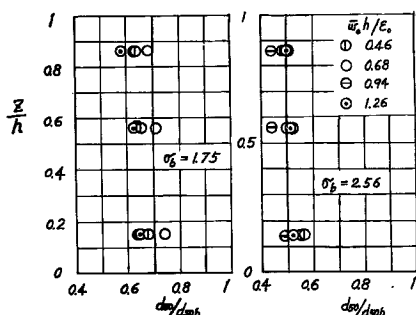


Fig. 9 Examples of distributions of median diameter of suspended sediment.

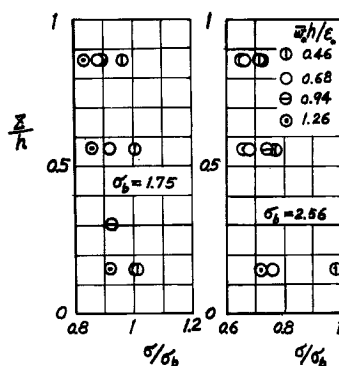


Fig. 10 Examples of distributions of standard deviation of suspended sediment.

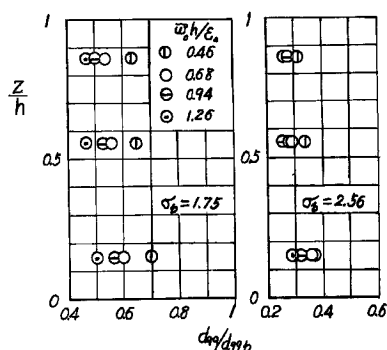
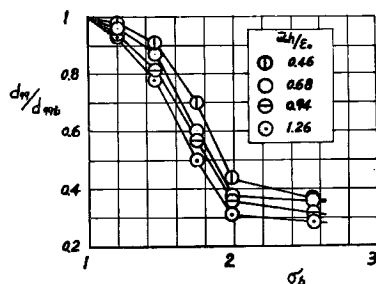


Fig. 11 Examples of distributions of maximum size of suspended sediment.


 Fig. 12 Variations of maximum size of suspended sediment at $z/h=0.15$ with standard deviation of sediment.

理由にもとくものと考えられる。まず、水底近傍においては、攪乱板の上下運動によってかなり乱れの特徴が変化することが考えられるし、また実際粒子の浮遊限界がこの付近の乱れの特徴によって規定されるため、各混合粒子の粒度分布特性に応じたフルイ分け作用 (sorting) をあらわすためと考えられる。Fig. 12 に示した結果は、前述した実験結果から、 $z/h=0.15$ における浮遊粒子の最大粒径と水底における混合粒子の値との比の標準偏差による変化を、 $w_0 h / \epsilon_0$ をパラメーターとして示したものであるが、これから上述した水底近傍の乱れによるフルイ分け作用を確認することができるであろう。

(5) 基準点における濃度の特性 後述した浮遊粒子の濃度分布を考察する場合には、Fig. 5 に示したようなある基準点の濃度の特性を明らかにしておかなければならない。これまで基準点の濃度として、水底から $z=0.15h$ における値 c_a を採用してきたので、この基準濃度の粒度分布特性および $w_0 h / \epsilon_0$ による変化について考察する。

まず、混合粒子を一定にして、 c_a と $w_0 h / \epsilon_0$ との関係を図示すると、一般に c_a は $w_0 h / \epsilon_0$ の値が大きくなるにしたがって、単調に減少し、その傾向は中央粒径が等しいとき混合粒子の標準偏差に大きく関係する

ことがわかったので、それら一連の実験結果から、基準濃度 c_a の σ_b および w_0h/ε_0 による変化を改めて図示したものが **Fig. 13** である。この結果によると、 w_0h/ε_0 の値のそれぞれについて、 c_a は σ_b によって単調に変化せず、 $\sigma_b \approx 1.6$ 付近において最大値をとり、それより σ_b の値が大きくなると、単調に減少していくことがわかる。そして、この特異な傾向は w_0h/ε_0 の値が大きいくほど顕著であるが、 c_a が最大値をとる σ_b の値は、 w_0h/ε_0 の大きさによってほとんど変化しないようである。いうまでもなく、これらの事実は乱れと混合粒子のスペクトル特性の複雑な関係にもとづくから、乱れの測定を行っていないわれわれの実験結果からは、その説明はできないが、乱れの特性和密接に関連していることを再認識することができる。

(6) 濃度分布に関する従来の方法による計算値と実験結果との比較 前述した考察から明らかなように、混合粒子の浮遊現象は乱れのスペクトル特性に大きく関係するようであって、単純に一樣粒子の浮遊に関する結果をそのまま適用することはできないが、従来の方法を適用した場合にどのような結果になるかということは、實際上興味があると思われる。従来の方法による混合粒子の浮遊濃度分布の計算式は、われわれが取り扱っている乱れの場合に対して、つぎのようにあらわすことができる。すなわち、(3) 式を積分した

$$c/c_a = \exp\{-(w_0/\varepsilon_0)(z-a)\} \quad \dots\dots\dots (3')$$

なる関係が、すべての粒子について成立するとし、そのおのおのの粒子に対する濃度はある基準点における粒度分布密度に比例するものとの考えから、混合粒子の濃度分布は、つぎのようにあらわされる。

$$\frac{c}{c_a} = \sum_a \left[f_a(d) \exp\left\{-\frac{w_0}{\varepsilon_0} \left(\frac{z}{h} - \frac{a}{h}\right)\right\} \right], \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 c_a : 基準点 $z=a$ における濃度、 $f_a(d)$: 基準点 $z=a$ における混合粒子の粒度分布密度、であり、右辺の和の記号は各粒径について総和することを意味する。なお、(4) 式右辺の w_0 はもちろん粒径の関数であって、一般には各粒子について実測して求めるべきであるが、前述したようにわれわれの用いた粒子も小さく、また比重も小さいので、十分 Stokes の法則が適用されるものと考えられる。したがって、以下の計算においては、すべて Stokes の法則によって w_0 の値を求めた。

Fig. 14 は (4) 式にもとづく計算結果と実験によってえられた濃度分布とを比較したものの一例である。いうまでもなく、 w_0h/ε_0 (ここに w_0 は前述したように中央粒径に対応した w_0 の値) を与えて、 c/c_a と z/h との関係で表示するとしても、 a/h としてどの値をとるか、また $f_a(d)$ としてどの粒度分布を採用するかということが問題となる。したがって、**Fig. 14** には $a/h=0$ あるいは 0.15 とし、 $f_a(d)$ としてはつぎの3つの場合を用いて計算した結果が示されている。すなわち、図中(1)として示したものは、 $a/h=0.15$ とし、かつ $z/h=0.15$ における浮遊粒子の粒度分布を用いた場合、(2)は $a/h=0.15$ とし、水底における粒子すなわち投入した混合粒子の粒度分布を用いた場合、そして(3)は $a/h=0$ として投入した混合粒子の粒度分布を用いて計算した場合の結果である。

これらの結果によると、(4) 式にもとづく計算結果すなわち各粒径ごとの濃度分布をある粒度分布にもとづいて加え合やすという方法は、一般には実験結果とは一致しない。とくに、 $f_a(d)$ として、どこの粒度分布を採用するか問題であるが、われわれの実験結果との比較からは、全体的にみて(3)の方法すなわち水底における混合粒子の粒度分布を用いた場合がよいように思われる。しかしながら、計算曲線と実験値と

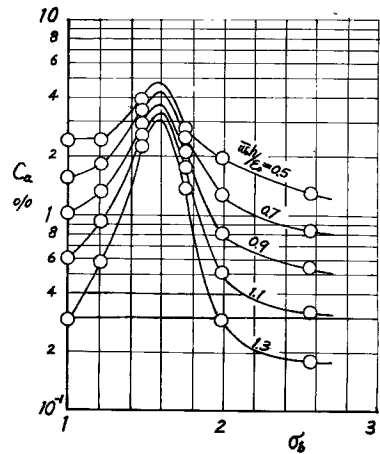


Fig. 13 Variations of c_a with σ_b and w_0h/ε_0 .

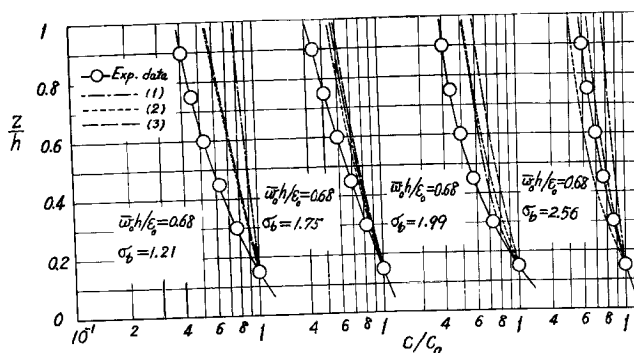


Fig. 14 Comparisons of theoretical curves and experimental results of sediment concentration.

- (1) when $a/h=0.15$ and $f_a(d)$ at $z/h=0.15$ is used.
- (2) when $a/h=0.15$ and $f_a(d)$ at $z/h=0$ is used.
- (3) when $a/h=0$ and $f_a(d)$ at $z/h=0$ is used.

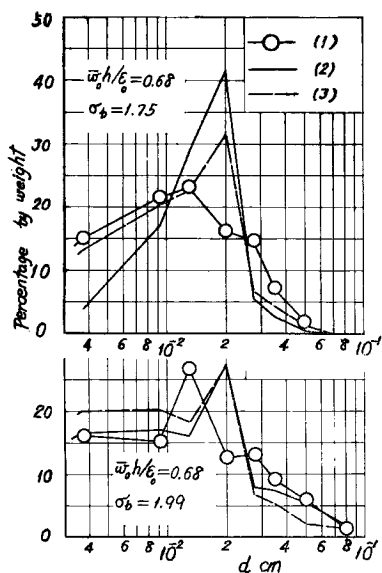


Fig. 15 Comparisons of size frequency distributions of suspended sediments at $z/h=0.15$.

- (1) measured at $z/h=0.15$.
- (2) size frequency distribution $z/h=0$.
- (3) computed from $f_a(d)$ at $z/h=0$.

の不一致は、 $w_0 h / \epsilon_0$ や σ_b の値によって複雑に変化するようであって、一般的な傾向を見出すことはむずかしい。なお、**Fig. 15** に示した結果は、前述した方法によって求められる浮遊粒子の粒度分布の一例である。図中(1)、(2)および(3)と記入した折線は、それぞれ **Fig. 14** 中における各曲線の計算方法に対応している。浮遊粒子の粒度分布に対して、これらの結果から、大体の傾向が一致することを認めることができるが、細部にわたっては決して十分な一致を示しているとはいえない。

以上要するに、従来から用いられてきた各粒径ごとの濃度分布を、その粒径のひん度に応じて重ね合わせるという方法は、一般的には成立しないようである。この事実は、各粒子ごとに成立するとした浮遊粒子の連続方程式に含まれる渦動拡散係数が、一定値をとらないことにもとづくものであり、そして混合粒子の浮遊現象における乱れと粒子の特性との相互干渉がきわめて複雑であって、詳細な議論は乱れと浮遊粒子のス

ペクトル特性の測定にまたなければならないであろう。なお、混合粒子の浮遊に関して Hunt⁴⁾ の研究があるので、この方法の適用について若干の考察を行なったが、やはり混合粒子の浮遊現象の本質をなんらかの方法で究明しなければならないことがわかったので、ここでは省略することにする。

4. 結 語

以上混合粒子の浮遊現象に関する二、三の実験結果を述べたが、一般にこの浮遊機構はきわめて複雑であって、その本質を解明するためには、さらに詳細な計測方法を考察し実験的研究を進める必要がある。本文では、もっぱら水工学上の実際問題において用いられている、混合土砂の浮遊濃度の推定に関する従来の方法が、適用されるかどうかという点について、実験的に考察したものである。その結果、混合粒子の浮遊現象には、そのような単純な方法は適用されないことがわかり、その理由について実験的に考察するとともに、この現象の本質に関連した二、三の実験的事実を明らかにすることができた。今後こうした問題をさらに究明する機会をえて、混合粒子の浮遊機構を解明していきたいと思っている。

本研究を行なうにあたって、助力をいただいた元技官久下元一氏はじめ海岸災害研究室の諸氏に謝意を表明するとともに、本研究が文部省総合研究費による研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) たとえば、石原藤次郎編：応用水理学，中 I，丸善，昭33，p. 25.
- 2) Rouse, H. : Experiments on the mechanics of sediment suspension, Proc. 5th Intern. Cong. for Appl. Mech., 1939, pp. 550~554.
- 3) Hinze, J.O. : Turbulence, McGraw-Hill, 1959, p. 277.
- 4) Hunt, J.N. : The turbulence transport of suspended sediment in open channels, Proc. Roy. Soc. London, A-224, 1954, pp. 322~335.