

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。浮遊流砂関数に関しては、数多くの貴重な研究が行われてきたが、近年混合粒径としての取り扱いや、非平衡の問題が特に注目を集めているようである。なかでも、実際河川における実測が盛んに行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鮮明になってきたことは大きな収穫とされなければならない。

ここでは、浮遊流砂に関する雑考(その1)⁽¹⁾に引きつづき、建設省技術研究会⁽²⁾で実施された実測結果などに基づいて、特に混合粒径特性に主眼を置いて次の諸点の検討を行う。

- a. 河川の浮遊流砂観測結果から得られた興味ある二三の特性
- b. 実用算定公式、およびその関数形に関する考察
- c. 河床砂と基底層における浮遊砂の粒度分布の関係

2. 実測結果に基づく混合粒径浮遊砂特性の検討

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。建設省などの実測結果から興味ある二三の特性について列挙すれば次のようである。

a. 浮遊流砂の粒径と濃度分布、浮遊流砂は一般に河床材粒の粒径に比し著しく小さい。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従い一様分布に近づく。また、小径砂は大径砂よりかなり割合が多い。長良川墨俣においては、流量範囲 50~3800 ㎥/s にわたり、約 50 日におよぶ浮遊砂観測が実施されている。これによると、浮遊砂粒度分布は採水点深による変化がほとんどなく、また d_{50} はいずれの水深位置においても、ほぼ 0.05 mm 程度であって、河床砂の平均粒径 5 mm に比して著しく小さい。しかも流量にほとんど無関係である。最小粒径は流量に関係なく 0.01 mm 程度である。最大粒径は 0.06~0.4 mm で流量の増大とともに大きくなっているようである。全浮遊流砂量には $Q_s = 1.0 Q^2$ (㎥単位)⁽¹⁾ のような関係が見い出されており、河床には存在しない細かい浮遊砂がほとんどであるが、いちがいに Wash load とするわけにもいかず、その取り扱いに問題が残されている。

b. 河川の浮遊流砂量と掃流砂量、大流量時の実測値はあまりないが、実測範囲では Wash load を含めた浮遊砂の濃度は 100~1000 ppm 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、平均の掃流砂濃度は 0.01~10 ppm 程度の範囲であって、浮遊砂濃度との差が大きい。これは、実験水路のような水深の小さい場合と異なり、総浮遊砂の 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できないであろう。

c. 洪水中の浮遊砂量の変化、不定流特性のみられる河川では、浮遊流砂量は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。吉野川中央橋における観測によると、出水中にピークの現われる順位は、勾配変化の実測はないが、浮遊砂濃度、流速、水位、流量の順になっている。浮遊流砂量には、流量よりは流速やまさつ速度との関連が強いようである。

d. 飽和度、河川の浮遊砂濃度は、上流各支川の影響や降雨特性の影響があるといわれている。長い河道、あるいは乱れの激しい河川以外は飽和度の検討が必要である。また、Washloadとみられる細かい浮遊砂は簡単には沈降しないものと考えられる。旧信濃川帝石橋では $Q=300\sim500\text{ m}^3/\text{s}$ で浮遊砂濃度は $70\sim150\text{ ppm}$ 程度であるが、約50km上流の大河津分水で270 $\text{ m}^3/\text{s}$ の信濃川の濁水を流入させたとき、帝石橋 $Q=422\text{ m}^3/\text{s}$ (40.9.19)で 1099 ppm の濃度が観測された。同一水位、同一流量の条件においても、上流の浮遊砂濃度が相当下流にまで影響を及ぼしているようである。

e. 高濃度の浮遊流、日本の河川では高濃度浮遊流の観測例はないが、荒れた砂漠地帯の粘土あるいはシルト分の多い河川では 10万 ppm 以上の浮遊流が生じる。Nordin⁽³⁾によれば、高濃度浮遊流の発生条件は、細かい浮遊砂の存在であり、それが砂の浮遊砂の増大を促進させるとしている。

3. 実用算定公式の係数に関する考察

理論式ではその基礎となる流砂濃度分布式および流速分布式において、河床付近の複雑な現象の影響が効果的であるが、未だ不明確な要素が残されており、実際の河道計画に適用する場合に完全の信頼をおくことがむずかしい。そこで総浮遊砂量の算定には簡単な関係式が用いられることが多い。

建設省技術研究会によって実施された全国河川の実測値によれば、

$$Q_s = \alpha Q^{\beta} \quad (\alpha - \text{sec単位, 容積}), \quad \alpha = 10^{-6} \sim 10^{-7}, \quad \beta = 2 \quad \text{---- (1)}$$

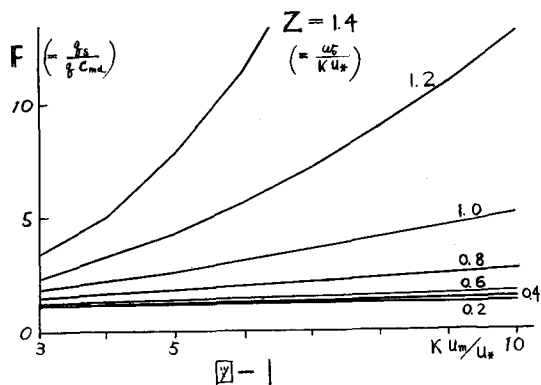
の関係が認められている。⁽¹⁾これは河床材料としては相当粗い河川までも含まれているが、浮遊砂の粒径は 0.1 mm 以下の細かい資料に基づくものである。この場合には、浮遊濃度分布が均一に近い状態である。粒径が大きくなると β は2より小さくなる。このことは理論公式から明らかにすることもできる。

簡単のため、基底濃度を与えろ高さ α は、Brooks⁽⁴⁾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。基底濃度 C_0 は掃流層の平均掃流砂濃度と与え、佐藤・吉川・茅田公式を適用すれば、浮遊流砂量は、

$$Q_s B = \frac{\varphi}{f} F B \frac{1}{\{(B_s/P)-1\}} \frac{1}{Y_0} \left(\frac{1}{Y_0} - 1 \right)^{-2} I F \quad \text{---- (2)}$$

となる。ここに、 B および B_s 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、 $f = U_b/U_{*c}$ 、 U_b は掃流層の平均流速、 $Y_0 = q/k$ 、および F は $Z = \omega/k_{*c}$ と Ku_m/U_{*c} の関数として、すでに数値計算の結果がBrooksにより与えられている。図-1はBrooksの図を書き換えたものであるが、 $Z < 10$ では F と Ku_m/U_{*c} とがほぼ直線関係になっていることがわかる。なかでも、 $Z=10$ の曲線は $Ku_m/U_{*c} > 4$ ではほぼ直線で、 $F \div \frac{1}{2} K \frac{U_m}{U_{*c}}$ のように表わすことができようである。(2)式において、 $U_m/U_{*c} = C/\sqrt{g}$ 、 $Y_0 = \exp(-Ku_m/U_{*c} - 1)$ および φ は粗度の関数である。そこで、たとえば洪水の減水期などで、勾配 I がほぼ一定であり、粗度の変化があまりなく、かつ粒径の効果である ω/U_{*c} がある範囲におさまっている場合には、(2)式より $Q_s \propto q$ が導かれる。 $Z=1$ とすると、 $\frac{U_m}{U_{*c}} = 0.15$ で、おおそ $d = 0.05\text{ mm}$ 程度に相当する。図-2はRio GrandeにおけるNordinおよびBeverage⁽⁵⁾による実測結果である。この地点の河床材料の粒径は 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-2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 0.25 mm 以上のものに対する浮遊砂量を示す。実線の勾配より β 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。



4. 基底浮遊砂層の粒度分布

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礎事項として次の条件を設ける。

a. 河床面あるいは河床面上に想定

する仮想浮遊河床砂層の粒度構成は p_i (%) である。

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と乗じたものに等しいとする。このとき、掃流砂との区別が明確でないが、このうち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いうことであらう。

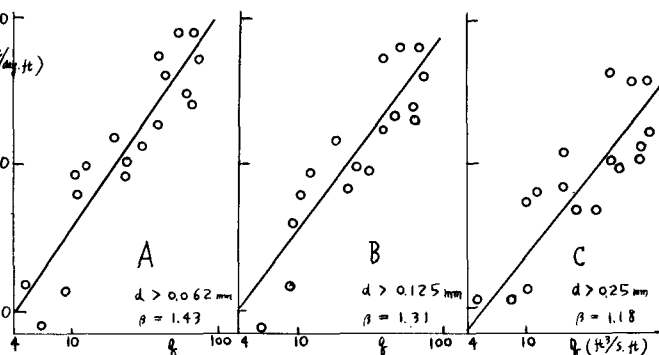


図-2

b. 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かたちで存在するが、Wash load はこの場合考慮する。c. 平衡状態では、基底浮遊砂層から仮想浮遊河床砂層へ沈降する量と浮上する量とが、各粒径砂毎に等しい。d. 浮上するときには沈降速度 w_i とは無関係に、仮想浮遊河床砂層の混合比が維持されるとする。また、粘性底層内の基底浮遊砂層から落下する砂粒は、乱れの影響を受けずに、静水中の落下速度 w_0 で近似できるものとする。沈降過程では濃度分布や粒度の影響は無視する。e. 基底浮遊砂層と仮想浮遊河床層の粒度構成の関係は、Wash load を除外すれば、沈降速度が重要な役割を演ずる。そこで簡単に、平衡状態では、仮想浮遊河床砂層からはその粒度構成 p_i' の比で土砂が浮上し、基底浮遊砂層からは w_0 に比例した量が沈降するとの仮定に基づくと、基底浮遊砂層の粒度分布 p_i'' は、

$$p_i'' = \frac{p_i' / w_{0i}}{\sum p_i' / w_{0i}} \quad \text{----- (3)}$$

と表わされる。

以上の考へには、仮想浮遊河床砂層の粒度構成を変えないで浮上するとの仮定があるが、これは浮上距離や渦の大きさおよび強さなどに関係する。また、浮上現象はむしろ間接的ともくされているが、これを時間平均的に考える。そして、まだ拡散の影響を受けていない浮遊砂といえる浮遊河床砂層(河床上の大径砂とか礫は含まれない)と乱れの影響が極くわずかである粘性底層内に想定する基底浮遊砂層との距離が十分小さいものとするれば、(3)式の基づく仮定の妥当性が認められるであらう。

次に、仮想浮遊河床砂層と河床砂の粒度構成の関係には、佐藤吉川・芦田公武の浮上機構の部分を用いる。このとき、河床砂と掃流砂の粒度構成の関係は $F_i / \{ (p_{si} / p) - 1 \}$ の比になっている。砂の密度一定のとき、基底浮遊砂層の粒度構成は、仮想浮遊河床砂と河床砂の関係とをいして、(3)式より、

$$P_i'' = \frac{P_i F_i / W_{oi}}{\sum P_i F_i / W_{oi}} \quad \text{-----(4)}$$

と表わされる。浮遊砂全体の平均粒度分布は粒径別の浮遊流砂量の割合から得られる。この場合、基底濃度を与える点の粒度構成を(4)式で与え、基底濃度は通常掃流砂量公式に基づく。基底浮遊砂濃度は河床から $a = 2d$ の層の平均を用いると、粒径に半比例して基底濃度が大きくなるので、 a を粒径に無関係とすれば、

$$q_s = \sum q_{s,i} = \frac{(9/k) P_i'' a/a'}{0.216 (P_{s,i}/P) - 1} gK u_*' \left\{ \left(\frac{u_{*mk}}{u_*'} + 1 \right) I_1 + I_2 \right\} \quad \text{---(5)}$$

である。(5)式では、 $a < d$ 、 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'' 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たとしたものである。

図-3の粒度分布曲線は、河床材料および浮遊砂粒度分布の実測値、ならびに(4)式および(5)式による計算値とを比較したものである。Aでは02Rの点の粒度分布と(4)式による基底層粒度分布の計算値とが粒径の大きい範囲を除いてかなり一致している。02Rより河床に近づけば大径砂が増えて計算値に近づくはずである。CおよびDはRio Grandeにおける実測値と比較したものである。Wash loadが相当量含まれていると考えられるので、0.062mm以下の河床に存在しない浮遊砂を仮りにWash loadとし、これを除外してみた。分離の仕方には問題があつて、(5)式による計算値は少し小さくなっているが、傾向としてこのような考え方の妥当性がうかがえる。

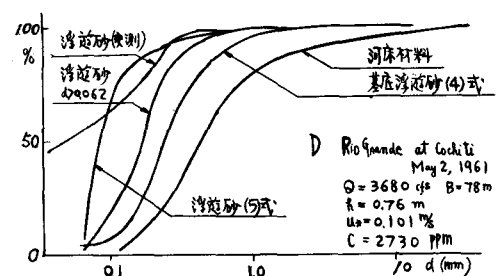
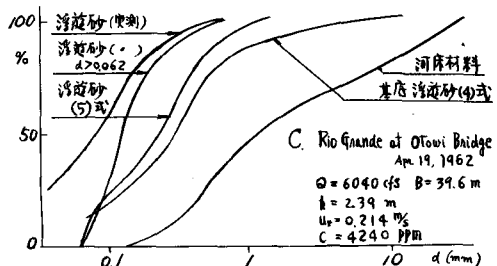
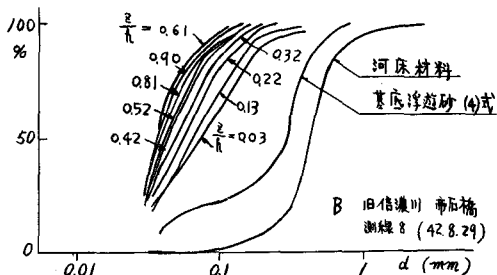
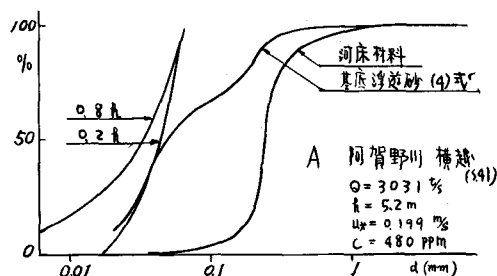


図-3 粒度分布曲線 (実測と計算の比較)

5. おわりに

浮遊砂の実測により種々の興味ある事実が明るみにされた。ここではその一部を報告し、多少の考察を加えてみた。河川における実測については、系統的な、精度よい観測が今後も一層切望される。それは浮遊砂関数の解明に大いに功献するものと期待される。

〔参考文献〕

- (1) 須賀 義三；浮遊流砂に関する雑考，土木学会年次講演会，5.42.5
- (2) 建設省土木研究所(土屋・須賀厚畑)；河床変動に関する研究，第19～21回建設省技術研究会，5.40～5.44
- (3) Nordin, C.F.；Study of Channel Erosion and Sediment Transport, ASCE, Hy 4, 1964
- (4) Brooks, N.H.；Laboratory Studies of the Mechanics of Streams Flowing over a Movable Bed of Fine Sand, Ph.D. dissertation, C.I.T.
- (5) Nordin, Beveridge；Sediment Transport in Rio Grande, New Mexico, Geological Survey Professional Paper 462-F, 1965