

土木研究所報告

第147号

急流河川の河床材料調査法と表面粒度特性.....山本晃一...(1)

混合粒径の限界掃流力, 主に二礫混合の場合.....山本晃一...(21)

ダム下流の河床低下に関する研究.....山本晃一...(31)

昭和51年5月

建設省土木研究所

急流河川の河床材料調査法と表面粒度特性

(昭和49年10月)

山 本 晃 一*

Sampling Method of Bed Materials in Mountainous River Reaches and Characteristics of Size Distribution of Bed Surface

(October 1974)

by Kouiti Yamamoto

Synopsis:

Bed materials in mountainous river reaches usually consist of gravels, cobbles and boulders. Therefore we cannot easily determine the size distribution by sieving them.

Moreover the size distribution changes in vertical direction in the bed. Especially in the case of reaches of no sediment supply like below dams, the sizes of bed surface materials become larger than those under the surface.

This paper presents a measuring method of the size distribution of bed surface materials and examples of two rivers by this method.

Key words (Graded Gravel)

要 旨

山地河川は、通常大粒径の河床材料から成り、普通のふるい分け試験が適用できない場合が多い。また深さ方向にも粒度分布が異なる。特にダム下流等上流からの供給土砂がストップしたような場合、表層の粒径が大きくなる。

ここでは河床表面材料の調査法を述べ、二つの河川の調査例について述べる。

キーワード(混合粒径)

目 次

1. まえがき.....(1)	(5) 表面粒度調査の応用.....(7)
2. 河床表面材料の調査法.....(2)	3. 急流河川の表面粒度特性と河床変動の 関係.....(7)
〔1〕 粒径とは何か.....(2)	〔1〕 はしがき.....(7)
〔2〕 表面粒度特性調査法.....(4)	〔2〕 天竜川秋葉ダム下流.....(7)
〔1〕 サンプリグ法.....(4)	〔3〕 黒部川.....(14)
〔2〕 サンプリグ標本の統計的处理.....(4)	4. あとがき.....(19)
〔3〕 サンプリグ必要粒子数.....(6)	
〔4〕 サンプリグおよび標本処理上 の注意点.....(7)	

1. まえがき

急流河川の河床は通常大粒径のものから成り、普通のふるい分け試験が適用できない場合が多い。また河床の粒度分布も通常深さ方向に非常に異なり、特にダム下流等上流からの供給土砂量がストップしたような場合、表面にアーマコートを生じ、表層の粒径が大きくなる。

土砂輸送の面から考えれば、河床面上の砂礫が動くのであるから、河床礫のサンプリグ法として、表面粒度分布を適確にとらえる必要がある。

筆者は、ダム下流の河床低下量を推定する方法を考えるにあたって、現地調査が必要であることを痛感し、河床表面材料の調査法を考え、二つの河川について調査を行った。ここにその結果について述べる。

*鹿島試験所研究員

2. 河床表面材料の調査法

〔1〕 粒徑とは何か

河床の砂礫の移動は、砂礫の大きさに大きく依存する。それゆえ、河床変動、流砂量を検討するに当って、河床材料調査が行なわれ、砂礫の粒徑が測られる。ところで河床に存在する石は球でなく、扁平であったり、でこぼこしている。そのため石の測定法、石径の定義法によって、粒徑に少しの違いを生じる。ここでは、これらの測定法、定義法の違いによる粒徑の差について論じてみよう。

石径の定義としては、次の三つが一般に使用される¹⁾。

- (イ) d_s : Sieve Diameter 粒子がふるいを通過しうる直径
- (ロ) d_{se} : Sedimentation Diameter 同一流体条件下で、同一の最終沈降速度を持つ、同一比重の球の直径
- (ハ) d_n : Nominal Diameter あたえられた粒徑と同一の体積を持つ球の直径

この三つのうち、流体の粘性、粒子の形状、粒子表面の粗さを略し、流砂の運動機構と結びつけた d_{se} が一番重要さを持つものであろう。しかし実際には、測定しやすいことから、粒徑によって d_s 、 d_n などの測定が行なわれている。

一般には測定の手間、測定装置の関係上

粒徑 $d < 0.074\text{mm}$ では d_{se} を測定 (JIS A 1204 による。)

$0.074\text{mm} < d < 100\text{mm}$ では d_s (JIS A 1102 による。)

$d > 100\text{mm}$ では d_n

が測定され d_{se} 、 d_s 、 d_n の差が小さいとして粒徑分布が把握される。

これらの相互の違いが、どれくらいであるか把握しておくことは、河床材料調査というものの精度を知る上で必要なことであろう。まず初めに d_n の測定法について論じてみる。

相当球径 d_n は、礫の重さ W と比重 ρ_s によって

$$d_n = \sqrt[3]{6 \cdot W / \rho_s \pi} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

となる。しかし重さを計るには、秤が必要であり、測定の手間さから、

(イ) 礫の三軸長 長軸 a 、中軸 b 、短軸 c

(ロ) 礫の三周長 長周 l_1 、中周 l_2 、短周 l_3

のどれかを測定し、 d_n を推定することが行なわれる。

(イ) と (ロ) の測定値より評価される粒徑を d_k とすると、 d_n と d_k の差が小さいものほど d_n の推定値として良いことになる。

いま $d_k = \alpha_i \cdot \phi_i$ として、 ϕ_i について次の12とおりの方法を考えてみる。

$$\phi_1 = (6/\pi \cdot c^2 \cdot a^{1/2} \cdot b^{1/2})$$

$$\phi_2 = \frac{1}{\pi} \sqrt{l_1 \cdot l_2 \cdot l_3}$$

$$\phi_3 = (l_1 + l_2 + l_3)/3\pi$$

$$\phi_4 = \sqrt[3]{a b c}$$

$$\phi_5 = (a + b + c)/3$$

$$\phi_6 = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{l_2 \cdot l_3}$$

$$\phi_7 = (l_2 + l_3)/2\pi$$

$$\phi_8 = (a + b)/2$$

$$\phi_9 = \sqrt{a \cdot b}$$

$$\phi_{10} = \sqrt{a \cdot c}$$

$$\phi_{11} = (a + c)/2$$

$$\phi_{12} = b$$

α_i は ϕ_i を何倍すれば d_k に近くなるかという係数である。

以上の12方法で d_n の推定値として、どの方法が良いかを確かめるために、多摩川調布付近の河床礫のサンプリングを行なった。採取礫数は114個である。比重は2.65であった。

α_i は次のように求めれば良い。採取した石の個数(標本数)を N とし、各標本に1から n の番号を付け、 j 番の ϕ_i と d_n を ϕ_{ij} 、 d_{nj} とすれば

$$P = \sum_{j=1}^N (1 - \alpha_i \cdot \phi_{ij}/d_{nj})^2 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

が最少になるように α_i を取れば良い。そのためには

$$2P/2\alpha_i = 0 \text{ より}$$

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^N (\phi_{ij}/d_{nj}) / \sum_{j=1}^N (\phi_{ij}/d_{nj})^2 \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

となる。最も良い評価値 d_k は、(2.3) で求めた α_i の値を使って P を最少、つまり標本 (d_i/d_n) の標準偏差

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (1 - \alpha_i \phi_{ij}/d_{nj})^2} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

が一番小さいものである。 σ_i が小さいとは、石の扁平

表-2.1 測定方法の違いによる α_i と σ_i の変化

d_i	α_i	σ_i	d_i	α_i	σ_i
d_1	1.051	0.146	d_7	0.963	0.071
d_2	0.889	0.073	d_8	0.778	0.120
d_3	0.874	0.076	d_9	0.800	0.118
d_4	1.039	0.084	d_{10}	1.049	0.123
d_5	0.952	0.090	d_{11}	0.932	0.115
d_6	0.974	0.072	d_{12}	0.970	0.155

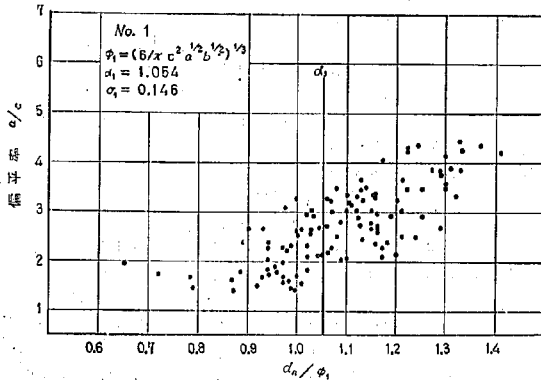


図-2.1

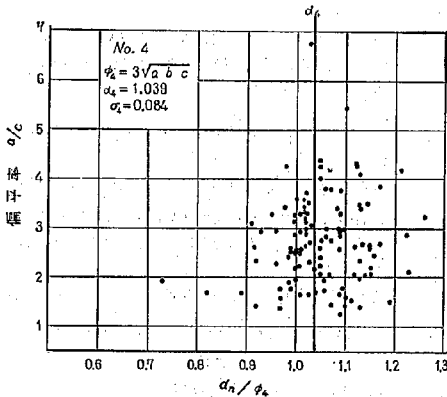


図-2.2

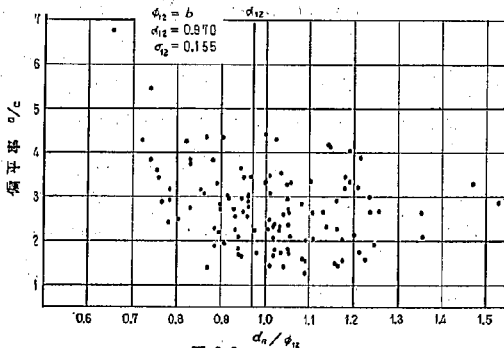


図-2.3

さを表わす $\beta = a/c$ などによって d_n と ϕ_1 の比が、あまり変化しないことを意味している。表-2.1に α_1 と σ_1 の結果を、図-2.1、図-2.2、図-2.3に β による d_n/ϕ_1 の変化を、 ϕ_1 と ϕ_2 、 ϕ_{12} の場合を示した。図-2.1を見ると、 ϕ_1 の場合 α_1 を β の関数とすれば、より正確に d_n を推定しうることを示している。表-2.1より、 $\phi_1 = (l_1 + l_2)/2\pi$ の方法が、 d_n の推定値として良いが、周長を計るより径を計る方が簡単であり、粒度調査というものの正確度、測定の難易さを考えて $\phi_1 = \sqrt[3]{abc}$ の方法がすめられる。また α_1 も 1 として十分である。

う。結局 d_n として

$$d_n = \sqrt[3]{abc} \dots \dots \dots (2.5)$$

がすめられる。

次に d_n 、 d_s 、 d_{sc} の違いについて述べる。T. C. Muir²⁾ は Tyne 河における河床砂礫の測定より表-2.2の結果を得ている。これによれば d_s は d_n より 8.2% 小さく、ふるい分け試験では、 d_n より小さめに見つめることになる。

表-2.2

d_i	d_i/d_n (T. C. Muir)	d_i/d_n (筆者の場合)
$d_{12} = b$	1.021	1.031
$d_1 = \sqrt[3]{abc}$	0.936	0.963
$d_s = \frac{a+b+c}{3}$	0.976	1.050
d_g	0.918	

d_{12} と d_n の関係は、 d_{12} が、沈降速度から決められるものであるから、球の抗力係数 C_f に関係する。抗力係数は、 $R_e = w d_{12} \rho / \mu$ (球のレイノルズ数で w : 沈降速度、 μ : 動粘性係数)、沈降する物体の形に関係する¹⁾。今 d_n の沈降速度を w_{0n} 、 d_{12} の沈降速度を w_{012} とすると

$$d_{12} = \frac{3}{4} w_{012}^2 \cdot C_{f12} \cdot \rho / g (\rho_s - \rho)$$

$$d_n = \frac{3}{4} w_{0n}^2 \cdot C_{fn} \cdot \rho / g (\rho_s - \rho)$$

より

$$d_{12}/d_n = (w_{012}/w_{0n})^2 \cdot C_{f12}/C_{fn}$$

通常の石では w_{012} と w_{0n} 、 C_{f12} と C_{fn} は 1 割から 2 割の差があると考えられ¹⁾、 d_{12} と d_n は 1~2 割前後の差があると考えてお

くべきである。

(2) 表面粒度特性調査法

(1) サンプリング法

従来、表面粒度のサンプリング方法として、

① 面積格子法

写真-1のように適当な大きさの木枠をもちいて、測定対象河床上の最大礫径間隔ぐらゐに糸を張り、糸の交点下の石を採取する。

② 線格子法

図-2.4のように河床面上に、巻尺等で直線を張り、一定間隔（河床材料の最大径以上）に区分し、その直下にある石を採取する。

③ 平面採取法

一定表面積中にある表面に露出した全礫を採取する。

④ 写真測定法

河床面を写真に写し、それを読みとる。

これらの①、②、③、④のうち、②の線格子法は一番道具も少なく、また河床礫のランダムな標本抽出という面もかなり良く②がすすめられる。なお粒徑の小さい場合は①の方法の方が正確であり、局所的な表面粒度の変化を把握できる。平面採取法は、すべての石を採取するから、一見優れているように見えるが、採取すべき対象の石を見分けられない欠点を持つ。特に小粒徑では表層と表層下の石の区別がつかなくなってしまう。現場での石の採取に時間が取れない時には、河床の写真を取り、写真上で①の方法を取れば良い。

(2) サンプリング標本の統計的処理

さて、河床礫を採取して前節の方法で d_n を推定したら、それをどのように処理したら良いか考えよう。

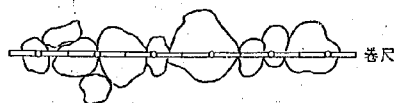


図-2.4 線格子法によるサンプリング

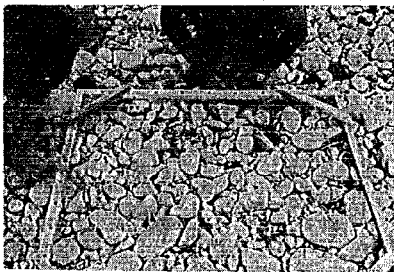


写真-1 平面採取法によるサンプリング

いま粒徑 d を確率変数として、それを X としよう。

$S(X)$ を $X=d$ の石が、河床面上に占める面積の支配確率密度、 $S(X)$ をその累加関数、つまり $S(X)=dS(X)/dX$

$m(X)$ を $X=d$ の石が、河床面に存在する個数分布確率密度、 $M(X)$ をその累加関数

$b(X)$ を河床面に存在する石の粒徑分布（重量による。） $B(X)$ をその累加関数

$f(X)$ を河床面の石の粒徑組成が、河床面下でも同じ組成を持っている時の河床面下に存在する石の粒徑分布密度（重量）、 $F(X)$ をその累加関数と定義する。

ところで「河床面にランダムに1点を決めた時、そこに礫径 d の石が存在する割合は、礫径 d の石が河床面上を支配する面積確率密度に比例する。」と考えて良い。この性質を利用することによって、 $S(X)$ 、 $m(X)$ 、 $b(X)$ 、 $f(X)$ は、お互いに次のような関係で結ばれることになる。

一定面積 C の中で考えて、 $X=d$ を dX の小区間に分け、 $(n-1)dX \leq X < ndX$ にある礫個数を $a(ndX)$ とする。

$$C = \beta \cdot \frac{\pi}{4} \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} X_n^2 \cdot a(ndX) \dots \dots \dots (2.6)$$

ここで $X_n = \frac{2n-1}{2} dX$ 、 $n_{\max}$ は最大粒徑に対する n 、

β は石の河床面での存在状態（かさなりぐわい）によって各粒徑ごとに変わるものであるがここでは平均値的な値としておく。

そうすると面積支配確率密度 $S(X_n)$ は

$$S(X_n) \cdot dX = \gamma \cdot \frac{\pi}{4} \cdot a(ndX) \cdot X_n^2 / C \dots \dots \dots (2.7)$$

γ もかさなりぐわいを表わす定数

河床表面礫個数分布密度 $m(X_n)$ は

$$m(X_n) \cdot dX = a(ndX) / \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} a(ndX) \dots \dots \dots (2.8)$$

また表面に存在する石の粒徑分布 $b(X_n)$ は、

$$\begin{aligned} b(X_n) \cdot dX &= \frac{\pi}{6} \cdot \rho_s \cdot g \cdot a(ndX) \cdot X_n^3 \\ &/ \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} \frac{\pi}{6} \cdot \rho_s \cdot g \cdot a(ndX) \cdot X_n^3 \\ &= a(ndX) \cdot X_n^3 / \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} a(ndX) \cdot X_n^3 \dots \dots \dots (2.9) \end{aligned}$$

$f(X)$ は次のように考えられる。河床面下で、どこかの水平断面で切っても、そこに出現する石の粒徑組成は、表面と同じであると考えられるから、単位体積中に占め

る X_n の石の重さは

$$\rho_s \cdot g \cdot \pi/4 \cdot X_n^2 \cdot a(n\Delta X) \cdot 1 \cdot (1-\varepsilon)/C$$

ここでは、空隙比、どの粒径 X_n に対しても、空隙比は一定であるとは考えられないが、ここで近似的に一定とすると

$$\begin{aligned} f(X_n) \cdot dX &= \rho_s \cdot g \cdot \frac{\pi}{4} X_n^2 \cdot a(n\Delta X) \cdot 1 \cdot (1-\varepsilon) \\ &/ \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} \rho_s \cdot g \cdot \frac{\pi}{4} X_n^2 \cdot a(n\Delta X) \cdot 1 \cdot (1-\varepsilon) \\ &= X_n^2 \cdot a(n\Delta X) / \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} X_n^2 \cdot a(n\Delta X) \end{aligned} \quad (2.10)$$

(2.6), (2.7) 式より $a(n\Delta X)$ を求め (2.8), (2.9), (2.10) 式に代入し、 $\gamma/\beta \approx 1$ を仮定すると

$$m(X_n) \cdot dX \approx S(X_n) / X_n^2 / \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} S(X_n) / X_n^2 \quad (2.11)$$

$$b(X_n) \cdot dX \approx S(X_n) \cdot X_n / \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} S(X_n) \cdot X_n \quad (2.12)$$

$$f(X_n) dX \approx S(X_n) \cdot dX \quad (2.13)$$

となる。

ところで先に、礫河床の1点を決めた時、そこに出現する粒径 d の石が存在する確率は、粒径 d の石が河床面上に支配する面積割合に等しいことを述べた。つまり、 $X=d$ である確率は $S(X=d)$ に等しい。

よってランダムに石を十分採取して $X=d$ の個数分布密度 $d(X_n)$ を作れば、 $d(X_n)$ は $S(X_n)$ の推定値となる。

$$\begin{aligned} d(X_n) \cdot dX &= e(n\Delta X) / \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} e(n\Delta X) \\ &\approx S(X_n) \cdot dX \end{aligned} \quad (2.14)$$

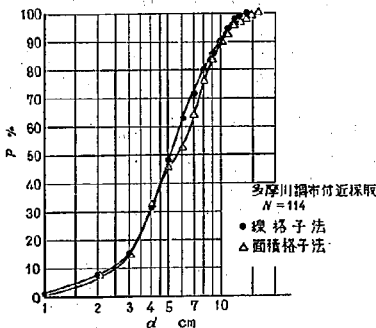


図-2.5 $E(d)$ V.S d

$$E(X_n) = \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} d(X_n) dX \quad (2.15)$$

ここで $e(n\Delta X)$ は $(n-1)\Delta X \leq X < n\Delta X$ にある採取礫個数である。このことは、線格子法、面積格子法によって採取した石の度数分布密度は $S(X)$ の推定値になることを意味している。(2.11), (2.12), (2.13)式によって $m(X)$, $b(X)$, $f(X)$ も推定できる。

図-2.5は、多摩川調布市付近の河床石を、面積格子法線格子法によって採取して $E(X_n)$ を求めたものである。両方法とも同一地点で行なったため、当然のこととして面積格子法と線格子法は、同じような曲線形となる。面積格子法は短い線格子法の和と考えれば、その理由が理解できよう。図-2.6、図-2.7は、(2.12), (2.11)

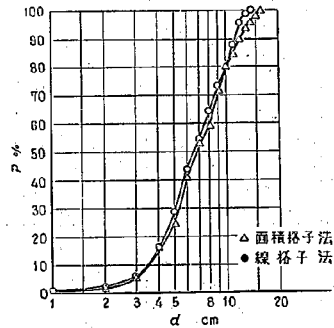


図-2.6 $B(d)$ V.S d

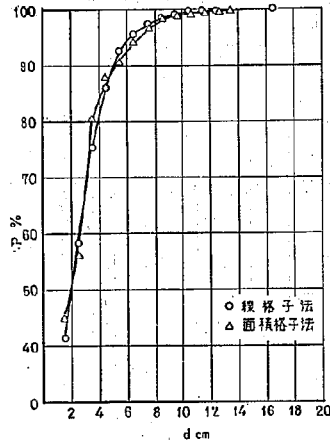


図-2.7 $M(d)$ V.S d

式によって $B(d)$, $M(d)$ を求めたものである。 $B(X)$ は $S(X)$ に比較して小さい粒径のものを小さめに、逆に $M(X)$ は大きくなるのが、図から良くわかる。

ところで (2.12), (2.13) 式は $\gamma/\beta \approx 1$, δ が粒径によって変化しないという仮定のもとで求まっている。この仮定の適用性を河村ら³⁾ が長良川で行なったサンプリング資料を使って確かめてみよう。彼らは面積格子法、線格子法によるサンプリングと、 1m^2 の河床面上の石の全露出粒子の採取 (平面採取法) を同一地点で行なっている。図-2.8 にその結果を示す。線格子法と面積格子法は $E(X)$ を示し、だいたい同じ曲線になる。平面採取した石は、ふるい分け、粒径加積曲線を示したもので $B(X)$ に相当する。河床面の $S(X)$ を線および面積格子法の平均値とし、(2.12) 式を使うことによって $B(X)$ を計算する。その結果を図-2.8 の●印で表わした。計算と実測は良い適合性を持っているといえる。(2.13) 式を確かめるためには次のようなことを行なった。数個の粒度から成る石を良くシャベルで切りかえし、人工混合材を作

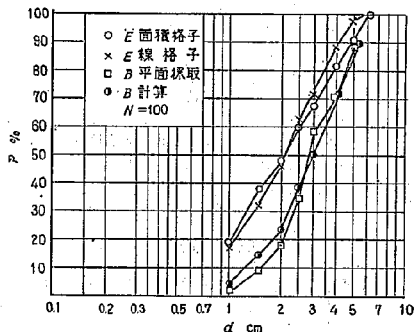


図-2.8

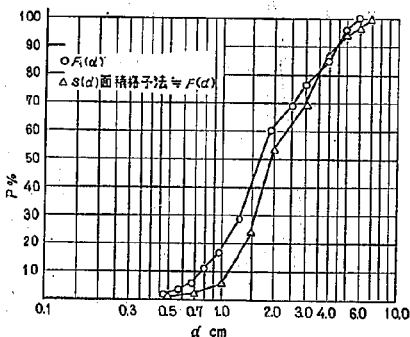


図-2.9

り、面積格子法と通常のふるい分け試験を行なった。図-2.9, にその結果を示す。この図で $F(X)$ は (2.13) 式による推定であり、 $F_1(X)$ がふるい分け試験の結果である。両者は一致しなければならないが、推定法は小粒径のものを小さめに見積っている。これは混合材が一様にならないことが大きな原因である。混合材の量が約 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 0.2\text{m}$ くらいしかなかったこと、小粒径の石は、表面では大粒径の石の間に落ちこんだことが、不様性の原因である。粒度分布の型によって、小粒径が表面に出るやすさが異なるのであろう。このことを考えれば、(2.13) 式はだいたい正しいと言える。

(3) サンプリング必要粒子数

(2) で述べた密度分布等を求めるには、どのくらいの石を採取する必要があるかを考えてみよう。

河村³⁾ らによれば、50個以上取れば良いと言っている。(彼らは分散既知の正規母集団の平均値に関する検定を行なっている。) ここで彼らと少し異なった方法によって必要採取個数を考えてみよう。

$d(X)$ は、近似的に平均 m , 分散 σ^2 の正規分布 $N(m, \sigma^2)$ と考えてみよう。いま母集団より標本数 N を抽出した時標本平均 $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$ がある信頼区間におさ

まるような必要個数 N を求めてみる。母平均 m , 母分散 σ^2 は我々は知ることができない。いま新しい確率変数として

$$T_N = \frac{(\bar{X} - m)}{S} \sqrt{N-1} \quad \dots \dots \dots (2.16)$$

を取る。ここで S^2 は標本分散で、

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2$$

そうすると T は自由度 $N-1$ の Student 分布

$$g(T) = \Gamma(N/2) / \Gamma(\frac{1}{2}) \Gamma(\frac{N-1}{2}) \times \left(\frac{1}{N-1}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{T^2}{N-1}\right)^{-N/2} \quad \dots \dots (2.17)$$

となる⁴⁾。いま標本平均が95%の確率で $(m - \beta, m + \beta)$ に落ちるためには

$$P(-\alpha_N < T_N < \alpha_N) = \int_{-\alpha_N}^{\alpha_N} g(T) dT = 0.95 \quad \dots \dots \dots (2.18)$$

なる信頼区間 α_N を求めて

$$\left| \frac{(\bar{X} - m)}{S} \sqrt{N-1} \right| < \alpha_N \quad \dots \dots \dots (2.19)$$

よって

$$m - \alpha_N \frac{S}{\sqrt{N-1}} < \bar{X} < m + \alpha_N \frac{S}{\sqrt{N-1}} \quad \dots \dots (2.20)$$

つまり

$$\beta = \alpha_N \frac{S}{\sqrt{N-1}} \quad \dots \dots \dots (2.21)$$

逆に β を決めた時、標本平均が95%の確率で $(m - \beta, m + \beta)$ に落ちるために必要な標本数は (2.21) 式であらえる。

$\beta = \epsilon m$ とすると (2.21) 式より

$$N = (\alpha_N / \epsilon \cdot K)^2 + 1, K = S/m (\text{変動率}) \dots (2.22)$$

となる。また $m \approx \bar{X}$ であり、 $K \approx S/\bar{X}$ として良い。

ϵ は標本平均 $\bar{X}$ が、母平均からの差をどれだけ許して良いかという誤差率と考えられる。〔1〕で述べたように、相等粒径として $d_i = \sqrt[3]{a b c}$ を使えば、 $\alpha_1 = 1.039$ 標準偏差 $\alpha_1 = 0.084$ を持っていたから、どんなに標本数を多くしても X そのものに平均数% (4~5%) の測定誤差を含んでいる。また d_n, d_{n+1} とは1割ぐらいの差があることから誤差率として1割 ($\epsilon = 0.1$) を許しても良いと考えられる。図-2.10は (2.18), (2.22) 式によって N と $S/\bar{X}$ の関係 $\epsilon = 0.05, \epsilon = 0.1$ に対して求めたものである。この図より備調査をして表面礫の変動率 K の概略値を知っておけば、必要最少なサンプル数が求まる。通常の河床では、変動率が0.5を越えることはめったにない。誤差として1割を許せば100個の石を採取しておけば充分であろう。

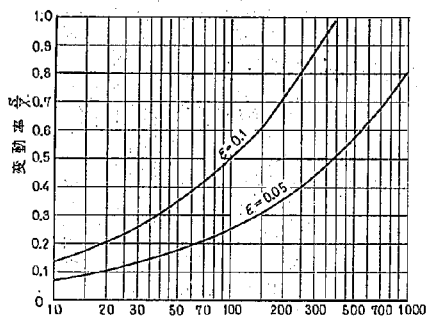


図-2.10 サンプリング必要個数

(4) サンプリングおよび標本処理上の注意点

- イ) ΔX として最大径が20cm以上なら、 $\Delta X = 1$ cm, 最大が10cmぐらいなら $\Delta X = 0.5$ cm として、 $m(X)$, $b(X)$, $f(X)$ を推定すれば良く、適当に選ぶこと。
- ロ) あくまでも格子点真下にある石を測定し、小さいからと言って取りのぞかないこと、実際問題としてmmのオーダーまでの石を取る必要がある。
- ハ) たまたま大きい石があつて二つの格子点にかかった時には、その石を一回測り、2個分とみなす。
- ニ) 線格子法の場合、格子間隔を30cmにし、採取個数を100個にすると、測線の長さは $0.3m \times 99 = 29.7m$ になる。このぐらいの長さになると測線をまっすぐに張る

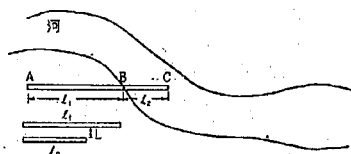


図-2.11

と水の中に入ったり障害物にぶつかったりする恐れがある。このような時、図-2.11のように L_2 分だけでも距離 L (最大粒径以上) だけ離れて平行に測線を延ばす。また最大粒径が大きく、あまりにも測線の長さが長くなって河床の粒度特性が変化するときにもこのようにする。

(5) 表面粒度調査の応用

表面粒度調査法は、次のようなことに応用できよう。

- イ) アーマコートの粒度調査によるダムおよび、せき下流の河床の安定性に関する検討
 - ロ) 表面河床材料調査より河床の粗度の判定
 - ハ) 山地大河床礫の粒度調査
 - ニ) 河床面材料の場所的違いを把握することによって、局所的河床変動機構の把握
 - ホ) 〔3〕(2) で述べたことを応用することによって、河床材料の発生源調査、その割合調査 (採取した石を岩質ごとに分け、〔3〕(2) で述べた方法を応用すれば、岩質ごとに、その重量割合を知ることができる。)
 - ヘ) 河床材料ふるい分け試験の代用、(表層を取り除き、面格子法を使って調査すれば、地中の粒度分布も知ることができる。)

3. 急流河川の表面粒度特性と河床変動の関係

〔1〕 はしがき

前述した表面粒度調査法を使って、天竜川秋葉ダム下流のように上流からの土砂補給が止まったような河川と、黒部川のように河床の流送土砂量の多い川との河床材料、河床変動を調べることによって、ダム下流の土砂の移動特性と、混合粒徑河床の変動過程を明確にするために調査を行なった。ここにその結果について述べる。

〔2〕 天竜川秋葉ダム下流

(1) 河川概況

天竜川は、長野県諏訪湖を水源とし、上流は長野県西南部山岳地帯を南下し、中流は愛知、静岡県境の峻険な山岳地帯を南下し、中流は愛知、静岡県境の峻険な山岳を縫って登田郡佐久間町より静岡県に入る。その間90余の大小支川を合せて、下流磐田、浜名両郡の静岡県における熱地帯を通過して遠州灘に注いでいる。延長216km



図-3-1 調査位置図

流域面積5,049km² (山地4,366km², 平地683km²) におよぶ急流大河川であり、流域形としてはすべての支川がほとんど東西から合流する羽状流域である。

河床材料調査地点は、天竜川本川の中流部(天竜川本筋河口より40.0km~46.25km)にあたり、静岡県磐田郡山村四川地先に築造された秋葉ダム(竣工昭和33年、堤高89m、堤頂273.4m、有効貯水量7,750,000m³)の下流に位置する。

流域内の本川は古期岩類の三波川結晶片岩類(緑色片岩、石堊片石等)中を大きく蛇行しながら南流する。特に距離程44.5kmの鮎釣地域では、大きな湾曲部があり右岸側は滑走斜面の堆積物が広く発達している。また調査地域の下流側の距離程39.5km付近では左岸側から気田川が流入する。付近の地形は急峻であり、河川はV字谷を呈する。河床勾配は約1/460である。

調査地点河床の礫種は、古期岩類の結晶片岩類が大部分を占めており、その他花崗岩類、石灰石等が認められる。このうち花崗岩類の供給源は秋葉ダムより約16km上流の佐久間ダム以上に分布する領家帯の花崗石に求められる。礫型は結晶片岩類および石灰岩はかなり扁平しており、花崗岩類は比較的に円型をていしている。

調査地域における土砂の流入は、秋葉ダムで沈積しない。微粒子と、秋葉ダム直下右岸から入る小さな沢が考えられる。このうち秋葉ダムからのものは粘土、シルト分が大部分を占め、その量も小さいと考えられ、ダム下流の河床変動への影響は無視できる。また調査地域下流の気田川は流域面積339.8km²で本川にかなり多量の

土砂を供給している。

(2) 調査方法

表面粒度調査は、各測点において線格子法によって100個の礫を採取し、三軸長を測定した。その測定結果より相当球径 $d_n = \sqrt[3]{abc}$ を計算し、面積支配確率 $S(d)$ を求めた。また均等比 M 、平均粒径 d_m 、偏平度 $a = bc/a^2$ を求めた。測定箇所は距離程46.2km~40kmの区間で、原則的には46.2km地点を起点として250mおきに、水際汀線で行なった。測定箇所数は、距離程44.5kmの湾曲部6箇所を加え31箇所である。なお44.5kmの湾曲部は、右岸擁壁近くを1として、水際近くを6として、その間を5等分した。

地中粒度は、46, 45, 44, 43, 42, 41km地点の6箇所、ふるい分け試験を行ない $F(d)$ を求めた。なおこの時、表層30cmを取り除き、それより30cmの厚さの層

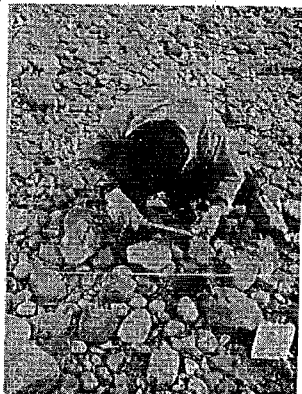


写真-2 45.25km地点

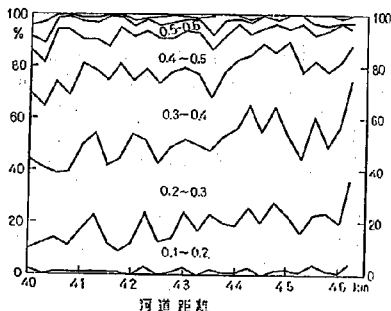


図-3-2 へんべい率の変化 天竜秋葉ダム下流

の河床礫を採取している⁶⁾。

調査期間は昭和45年12月14日から12月27日までである。なお参考として、浜松（旧磐田）工事事務所で行なった粒度調査、河床横断面測量を使用した。

(3) 調査結果

写真-2は45.75km地点の線格子法による計測作業中の写真である。写真を見ると河床材料はかなり偏平なものがある。この偏平さを調べるために偏平度 $\alpha = bc/a^2$ を調べてみる。図-3.2に各調査地点で線格子法で採取した100個の石の偏平度 (bc/a^2) の分布を河道距離に沿っ

て示したものである。また図-3.3に100個の石の平均偏平度の分布の変化を河道に沿って示した。これを見ると各地点とも平均偏平度が0.25~0.35までの中に入り、上流ほど平均偏平度が小さく、下流に向かって順次値が大きくなる。同様に図-3.2においても主モードが左さがりになっている。このことから、礫が河床上を滑動および転動、流砂によってこすられて円磨されたことがわかる。

平均粒径のダムからの距離による変化、地中と表面の違いを図-3.4に示した。ここで、○、●印は昭和41年に浜松（旧磐田）工事事務所で調査したもので、○印は表

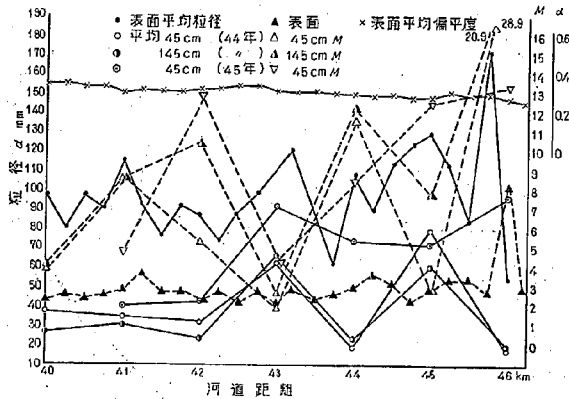


図-3.3 天竜川秋葉ダム下流粒度特性変化

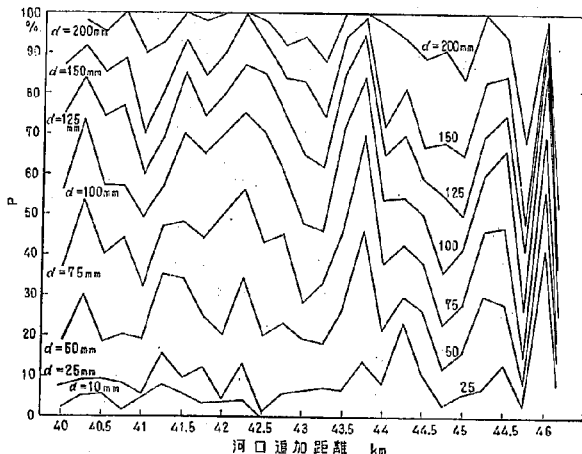


図-3.4 天竜川河床表面粒度

層20cmを取り除き50cmの中の石を、(●印)は1m20cm表層を取り除きそれから50cmの中の石を調査したものの

平均粒徑である。なおこの時は左右岸、流心の3箇所で調査された。ここに表示したのは、左岸、右岸、流心の3

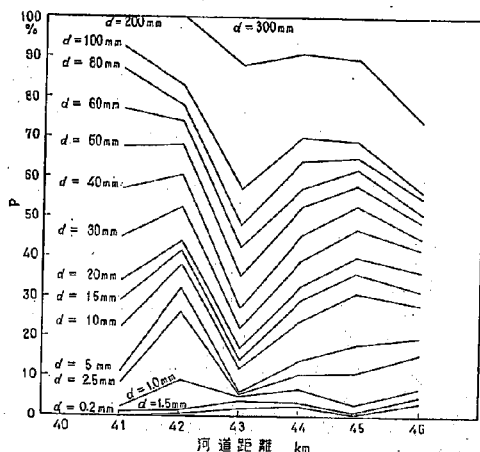


図-3.5 昭和45年度Sampling 天竜川45年地中サンプリング

箇所の平均粒徑の平均である。◎印は今回の調査のものである。表面石の平均粒徑は、もし河床面の石の粒徑組成が河床面下も一様であれば、 $S(d) = F(d)$ となる。この図より明らかに表面石は地中粒徑より大きく、アーマコートの河床に存在することがわかる。昭和41年度の調査において平均45cm、145cm深さの石の粒徑が、ほとんど同じであることより、表層20cmから170cmの間は粒徑分布がほぼ同じであり、アーマコートの厚さが、表層一粒徑位であることがわかる。なお45年度と41年度で地中粒徑が44km、46km地点で異なるのは調査地点のずれによるものと考えられ、この深さの粒徑組成が変化したものではないと考えて良い。

次に河床の混合特性を均等比 M と粒徑分布について述べよう。図-3.3に均等比の場

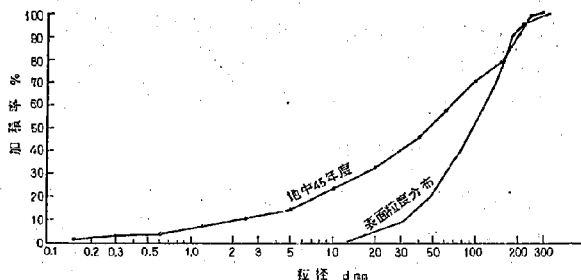


図-3.6 天竜川44km 地点表面と地中の粒徑分布

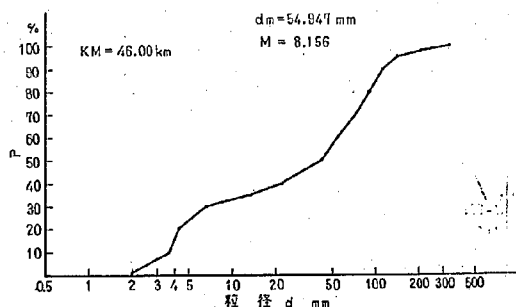


図-3.7

所的変化、図-3.4に表面粒度分布 $S(d)$ の場所的变化、図-3.5に地中粒度分布 $F(d)$ の場所的变化を、図-3.6に44km地点の表面粒度分布と地中粒度を示した。図-3.6に典型的に示されるように、表面の石は小粒径がぬけ落ちてゐる。表面石の粒度分布形は平均粒径が少し異なるが、全調査地点ではほぼ同じであり、図-3.3に示されるようにに均等比が2~3の間である。ただ46km地点は均等比8.2、平均粒径55mmであり、他の調査地点と異なっていた。46km地点の粒度分布は図-3.7であり、4~7mm, 60~120mmが多い二峰性を示している。これは小出水の時ダム直下右岸の沢から出た小粒径の河床材料が、ちょうど46km地点に沈積し大粒子の間につままっているためと考えられる。なお均等比2~3は、室内の混合粒径河床の河床低下実験における最終表面石の均等比が、このくらいであり、静的に安定な粒度分布と考えられる。地中の均等比は調査地点ごとにかなり異なり、動的な河床では河床に働く掃流力の少しの差が、河床材料の分

布を大きく変えるのであろう。

(4) 河床材料と河床に働く掃流力

次に河床表面石の粒度特性と河床に働く掃流力について考えて見る。アーマコートの生成した安定な河床は、河床に働く掃流力に対応した粒径をとるはずである。

Egiazaroff¹⁾ の考えによれば、混合粒径河床では、河床の平均粒径に対する限界掃流力の約8.6割の掃流力で全粒径に対して動がなくなる。つまり混合粒径の静的平衡な河床の平均粒径は、河床に働く掃流力の約1.16倍の掃流力に対応する粒径になっているはずである。

天竜川秋葉ダム下流で不等流計算し河床に働く掃流力を $\tau = \omega R I_0$ として求め、この掃流力に対する限界粒径を計算した。その結果を流量5000, 4000, 3000, 2500, 2000 m^3/s に対応する結果を図-3.9に示した。同図には表面粒度測定結果より求めた d_m も図示した。この図を見ると、表面平均粒径と計算値の一致は良くないが、粒度調査時点の表面粒径を作った流量は2500~2000 m^3/s の間くらいだろうと推定される、ここで2000 m^3/s におい

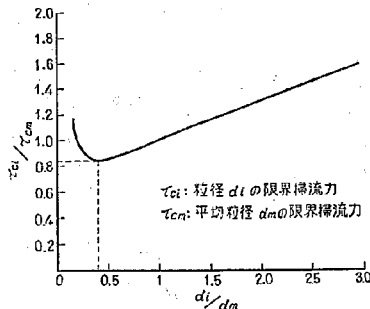


図-3.8 Egiazaroffによる混合粒径の限界掃流力

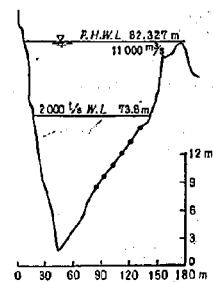


図-3.10 天竜川44.5km

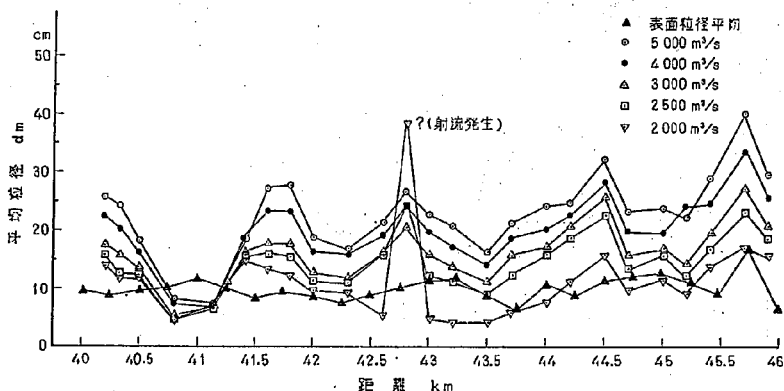


図-3.9 不等流計算による平均粒径

て42.8kmにおいて粒径が大きくなったのは、計算上42.56kmに射流が発生したためであり、実際の2000m³/sの流れを現わしていない。また計算値と実測値の一致が良くないのは、粒度調査地点が河床に俵く平均的な掃流力

に対応する点でないためでもあろう。

河床に俵く掃流力は、ゆるやかな斜面では水深に比例して $\tau = \omega H I_e$ と言われている。もしこれが正しいとすれば、同一断面においても静的平衡な河床では、河床の粒径は水深に比例したものになるであろう。これを確かめるために次のような調査を行なった。天竜川44.5km地点は大きな湾曲部が有り、右岸側は滑走斜面となり堆積部が広く発達している。この地点で図-3.10に示すように横断方向に6箇所、表面石の粒度調査をした。その結果を図-3.11に示す。同図には不等流計算より求めた44.5km地点の I_e を使って、各地点の $\tau = \omega H I_e$ を求め、次にEigiazoroffにしたがって d_m を求めた結果も示した。この図によれば、表面粒径を作った流量が2000~2500m³/sであり、ゆるやかな斜面では d_m は水深に比例することなどが推定される。

(5) ダム下流の河床変動と支配流量

昭和145年調査時点における河床は、いつごろ生じ、表面粒径を作った流量2000~2500m³/sは、天竜川でどの

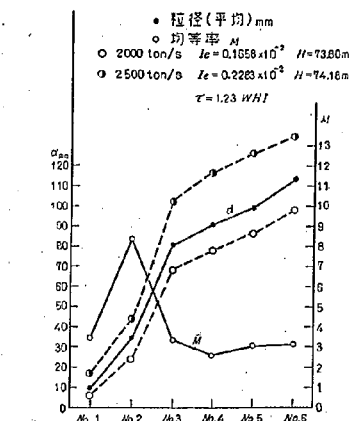


図-3.11 天竜川(44.5km)湾曲部横断方向

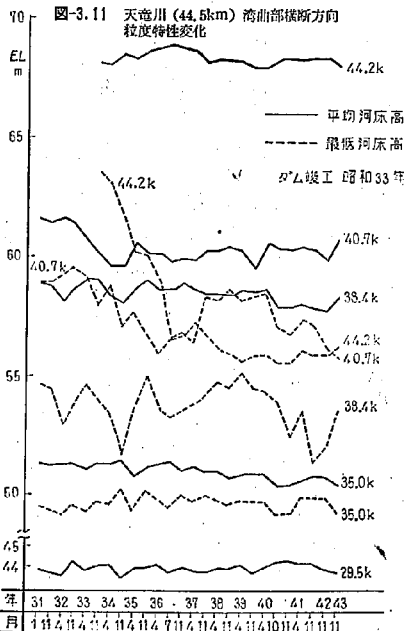


図-3.12 秋津ダム下流河床変動状況図

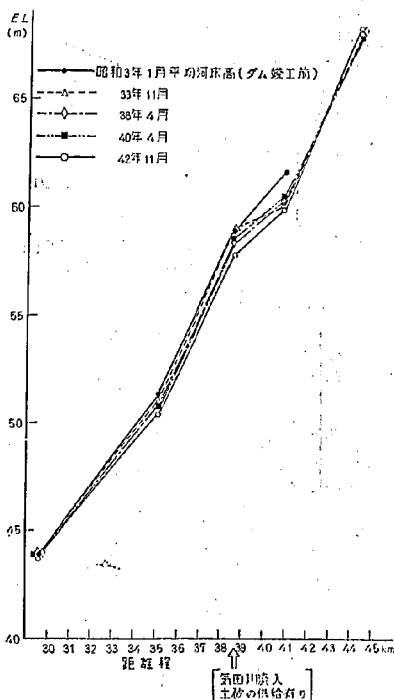


図-3.13 天竜川秋津ダム下流の河床縦断面図

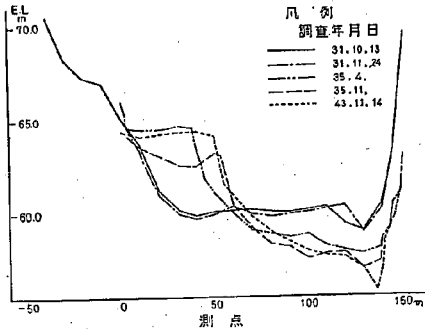


図-3.14 40.7km地点の横断面の変化

くらの傾度かを調べてみる。

図-3.12に秋葉ダム竣工時よりの河床変動状況図、図-3.14に秋葉ダムの平均河床高（現在の計画高水位以下の平均河床）の縦断変化を示した。図-3.14、図-3.15は40.7km地点、44.2km地点の横断面の変化図である。また昭和31年より44年の12年間の河口より25km地点の鹿島量水所（流域面積4480km²であり、秋葉ダム地点流域4500km²間には気田川339.8km²、阿多古川79.6km²の支川と小沢が本川に入っている。）の日平均流量を流量年表より調べると

6000m ³ /s～7000m ³ /s	1日
5000m ³ /s～6000m ³ /s	0日
4000m ³ /s～5000m ³ /s	4日

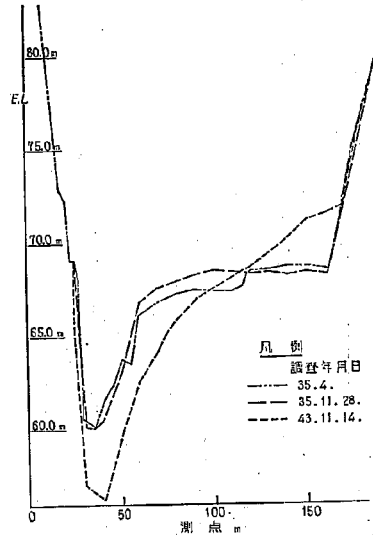


図-3.15 44.2km地点の横断面の変化

3000m ³ /s～4000m ³ /s	6日
2000m ³ /s～3000m ³ /s	18日
1000m ³ /s～2000m ³ /s	58日
0m ³ /s～1000m ³ /s	4237日

である。鹿島地点流量は秋葉ダム地点より1割から2割

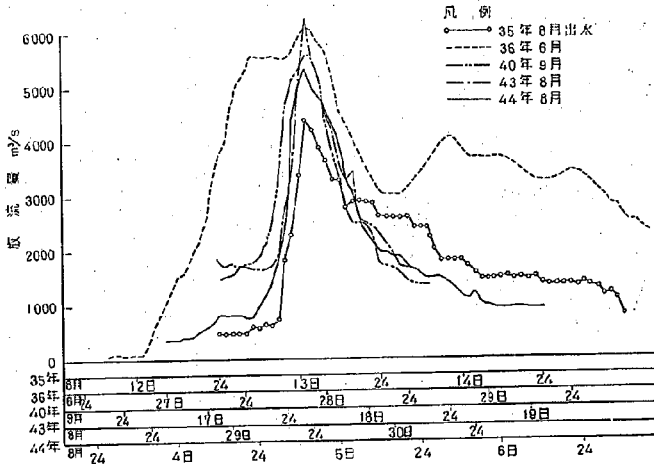


図-3.16 秋葉ダム放流量ハイドログラフ

流量が多い。図-3.16に代表的な秋葉ダム放流量ハイドラグラフを示す。これらの図表より次のことが言える。

秋葉ダム下流46km地点から40km地点の現河床表面材料を作った流量は、年1回は超る最大日平均流量ぐらいである。

河床変動を見ると、29.5km地点船明地点の河床高は

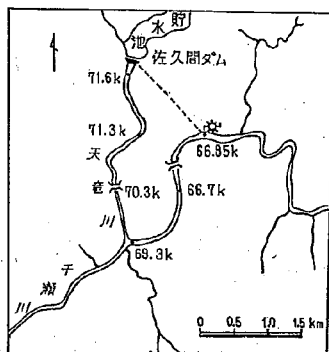


図-3.17 佐久間ダム下流

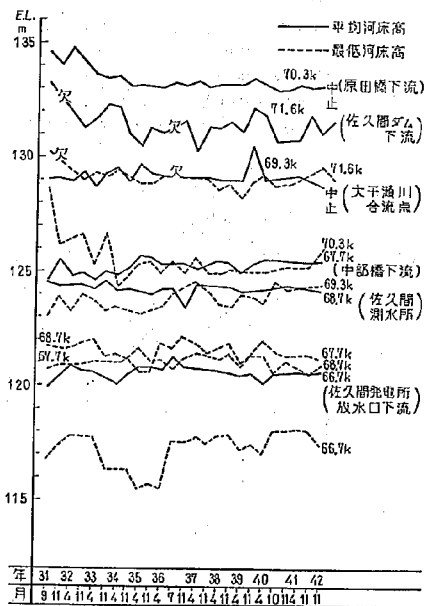


図-3.18 天竜川佐久間ダム下流河床変動図

平均河床、最低河床とも31年以来ほとんど動いていない。38.4km地点は支川気田川合流部から約1.5km下流で河床は少し低下傾向にあるが、それほど下がっていない。このことは気田川合流部より下流の土砂輸送量と気田川からの土砂流入量が、ほぼ等しいことを示している。

40.7km地点を見ると昭和33年(ダム竣工年)より河床の低下が見られる。平均河床は約1.5m下がっている。44.2km地点は平均河床は33年11月以来それほど低下していないが、最低河床は昭和36年6月山水によって急激に下がり、その後2mほど埋めもどされている。これらのことから秋葉ダム下流では、ダム竣工後1~2年で表層の小粒径が洗い流され河床低下した後、大流量によって表層のアーマコートを破壊されたりしながら45年調査時の河床状態に到達したと考えられる。45年調査時点の河床は今後の大出水によってまだ変動していくものであろう。ただし3000m³/s以下の流量では河床はほとんど変動しない。

秋葉ダム上流には、佐久間ダム(貯水量205,444,000m³, ダム高150m, 竣工昭和31年10月15日, 河口より72.6km, ダム地点流域3,829km²)がある。この下流でダム竣工後の河床変動調査が行なわれている。秋葉ダム下流の河床変動と比較してみよう。図-3.17, 図-3.18にダム地点平面図と、河床変動図を示した。69.4km地点には、流域面積341.3km²の大千瀬川が本川に入っていて、ダム地点とこの間には支川は入っていない、土砂供給源は無い。71.6km地点で約2m, 70.3km地点で1.5m河床が低下している。また大千瀬川合流点より下流は、河床低下が無い。秋葉ダム下流の河床低下と同様な河床変化であり興味深い。

(3) 黒部川

(1) 河川概況

黒部川は北アルプスの鷲羽岳に源を発し、途中に支川を合流し山間部を流れ愛本(河口より13.0km)に至り、そこから黒部扇状地を流下して、日本海に注ぐ流路延長85km, 流域面積682km²の急流河川である。流域の岩質は花崗石が多く、急峻で寒冷多湿のため岩石の風化が激しく、崩壊地も多類あり流出土砂量の多い河川で、年間約100万m³程度の土砂が流出していると考えられている。

河床材料調査地域は、河口より20km区間である。河床勾配は、図-3.19に示すごとく急勾配である。13km地点は、狭窄部でここに愛本堰があり、ここを扇頂として黒部川扇状地が広がり、流路は平水時には扇状に流下している。

既設設備（発電所）表

発電所名	P (kW)	発電所名	P (kW)
黒部川第三	81,000	黒部川第3	5,140
黒部川第二	72,000	黒部川第1	7,760
柳河原	54,030	黒部川第2	6,330
愛本	29,700	黒部川第4	6,300
黒部川第四	258,030	黒部川第5	1,489
新黒部川第三	56,000	黒部川第6	1,210
新黒部川第二	40,000	歌太蔵	1,500
黒部川第二	7,000	計	627,430

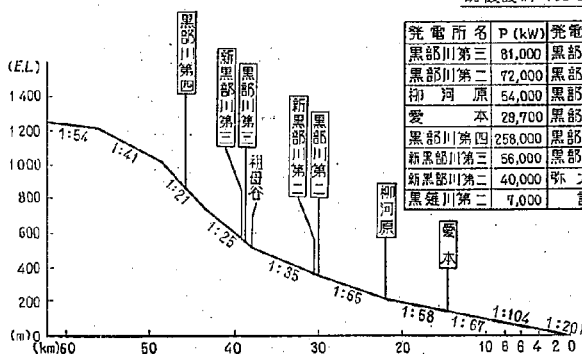


図-3.19 黒部川縦断面図

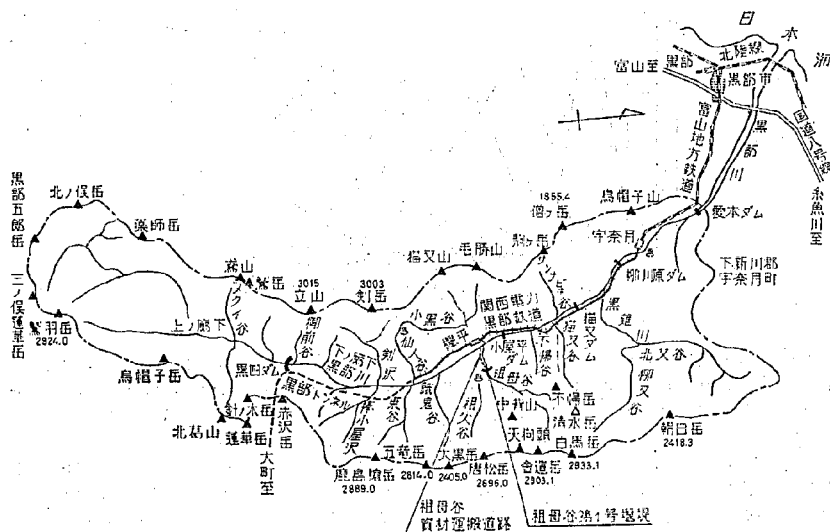


図-3.20 黒部川流域概要図

(2) 調査方法

表面粒度調査は、各測点において線格子法によって100個の礫を採取し、三軸長を測定した。その測定結果より相当球径 d_n と $Vabc$ を計算し、面積支配確率 $S(d)$ を求めた。それより均等比 M 、平均粒径 d_n を求めた。測定箇所は河口より、0, 2, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18.8kmで同一距離程で横断方向に3測線行なった。地中粒度の調査は、北陸地方建設局共通仕用書にもと

づいて行なった。調査は昭和45年12月に行ない、黒部川工事事務所が担当した。昭和46年10月にも、地表面と地中粒度の調査が行なった。ただこの時には、一横断面で一測線の地表面の粒度調査である。なお黒部川では毎年河床材料調査が行なわれ、その調査結果も参考にした。

(3) 調査結果

○表面粒度と地中粒度

黒部川下流部における昭和45年12月の地中粒度特性

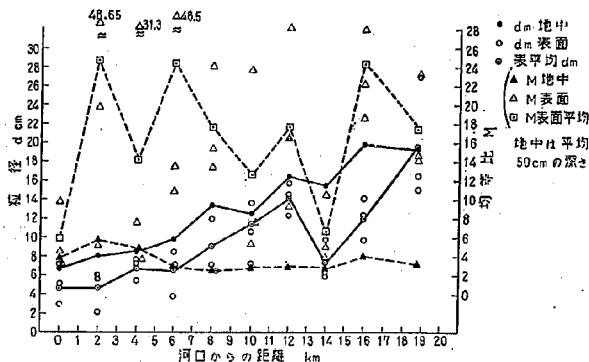


図-3.21 表面と地中の粒径特性(昭和45年12月)

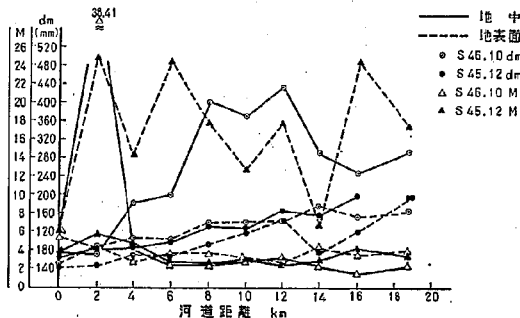


図-3.22 地中と表面の石の平均粒径と均等比

(表層30cmを置き除き、50cm深さの粒径特性)と表面粒径特性を図-3.21に示し、図-3.22に45年と46年の平均粒径の違いを示した。表面粒径は地中粒径より小さい。特に46年度は顕著である。45年度の均等比を見ると地中では0~20km地点まではほとんど変化せず同じような粒径分布形を持つのに対して、地表面では均等比が一横断面上の三測点でかなり異なっていて、また値が大きい。これは表面では小粒径が多く二峰性の粒径分布になっているためである。

黒部川のような網目状流路を持つ河川での河床物質は、一般に大礫から細礫までさまざまな粒径の礫からなっている。このような河床材料の不均一性は、出水ごとの流量の増減による掃流力の増減によって網目状流路を変化させると同時に、河床材料の分級をうながす。表面粒径を計った通常の流いで水の乗らない所では、小出水時には流速も速くなく、小粒径のものが表面にたまりやすいのであろう。もちろん上流から小粒径の給砂が無けれ

ば表面の小粒径も洗い流されていく。昭和46年における表面石の平均粒径の増加、均等比の減少はこれが原因であろう。

○昭和44年8月豪雨前後の河床材料の変化

昭和44年8月の梅雨前線による出水は、8月11日に愛本地点でピーク流量約5700m³/sに達した。この洪水による被害は、黒部ダムの計画堆砂量5,000万m³に対し、貯水面下に650万m³、貯水池近くの支川出口付近に560万m³、計1,210万m³の堆積があり、実に計画堆砂量の約1/4に相当する。さらに、これより下流の祖母谷第1号堰堤は、この出水のみで28万m³の堆積があり、小黒部谷、不帰谷、猫又谷、黒龍等でもかなりの量にのぼる堆積があった。この出水により宇奈月温泉の引湯管が破壊されたのと、県道及び地方鉄道が不通になるなど多大の被害があった。下流部における災害は、宇野月より下流の堆積土砂量は90万m³、床上、床下浸水233戸、田畑の冠水538ha、堤防破壊4箇所630m、根固め流出等未曾有

表-3.1 黒部川砂利採取量 単位万 m^3

	S33年	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
許可量	1.0	1.0	1.0	3.6	6.3	8.3	22.5	13.5	18.9	30.3	46	62	70	70	70
推定採掘量								16.6	24.8	40.3	50	93	70	80	

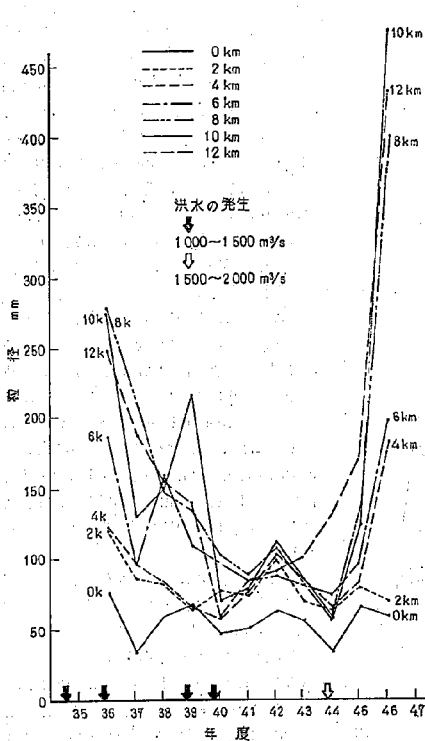


図-3.23 平均粒径の経年変化

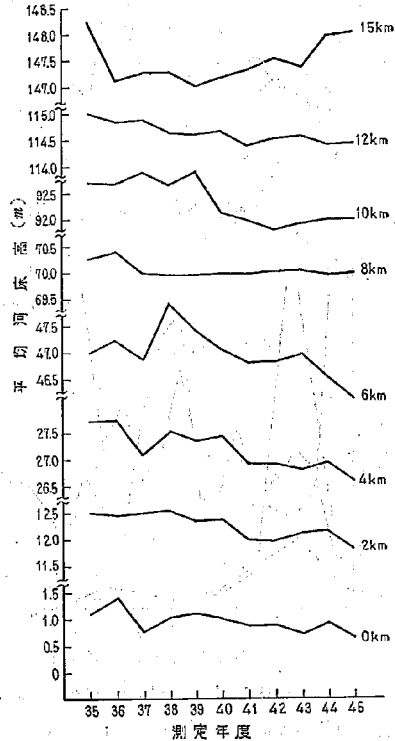


図-3.24 平均河床高の変化

の大災害であった。

このような出水前後の河床材料特性の変化を調べて黒部川のような動的な河の流砂特性、変動特性を解明していこう。

まず始めに、ここ10数年間にわたる黒部川の河床材料の変遷をながめ、この川の特性を調べておく。図-3.23に平均粒径 d_m の経年変化を距離毎2kmごとに示した。図-3.24に平均河床高の経年変化を、表-3.1に13km地点より下流の砂利採取量を示した。扇状地部分の13km地点の河床変動を見ると全体として河床底下の傾向にある

ようである。砂利採取の影響が大きいと思われる。河床材料は河床勾配が小さく、海からの影響を受ける0km地点ではそれほど大きくは変動しないが、2kmより上ではかなり変動する。特に昭和36年の平均粒径が大きく、その後徐々に小さくなり、40年ごろからはほぼ同一平均粒径を続け45年、46年と急激に大きくなっている。黒部川のように土砂供給源（崩壊地）に近く、扇状地に入っても勾配が大きい荒廃河川では、河床材料は、土砂供給源の土砂量、流量の変動、砂防堰堤の築造、砂利採取などによる流砂量の変動が大きいため、大きく変動す

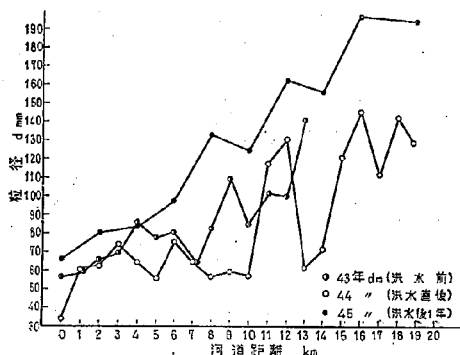


図-3.25 44年8月出水前後の平均粒径

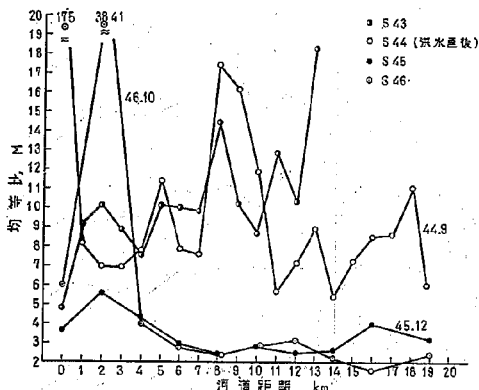


図-3.26 洪水前後のMの変化

表-3.2 限界粒径(岩垣式)と流量 単位cm

距離 流量	0 km	2	4	6	8	10	12
50m ³ /s	2	4	5	8	7	11	8
100	3	5	6	10	7	13	8
200	3	5	6	12	11	16	11
300	4	6	7	14	12	18	12
400	5	6	8	14	13	—	14
500	5	6	8	15	14	—	15
2000	11	11	14	25	24	21	29
3000	13	15	18	33	30	27	32
4000	16	18	22	40	35	32	35
5000	17	21	25	45	40	38	39
6000	20	23	28	49	44	42	42

—は計算不能

る。平均粒径が大きくなるのは上流からの小粒径の給砂量が、扇状地での小粒径の輸送量、採取量より小さい場合であり、45年、46年はこのような状態であった。図-3.25、図-3.26に出水前後の河床材料の変化を示した。これを見ると昭和43年 d_m と洪水直後では平均粒径は、それほど変わらず、また均等比も大きくは変わらない。このことは扇状地からの流出土砂が大小の粒径を含み、43年の河床材料分布に近かったものと思われる。(なお44年の洪水直後の河床材料調査は、一横断面2点で行なわれている。この2点の粒度分布が13km地点より下流では、0km地点、1km地点を除きほぼ同じであり、網状流路を持つ河川では出水中には局所的な掃流力の差は無く、大きなスケール(川幅、河床勾配、流量)によって掃流力が決められ、一横断面はほぼ同一掃流力を持つと考えらる。)ところが昭和45年度調査によれば、粒径は増し、均等比 M も小さくなり、粒径の均一性を増している。この傾向は46年も続き、図-3.27の10km地点の粒度分布の変化によって、より明確化される。このように100mm以下の粒径が抜け出したのは1つには砂利採取であろう。しかしこれだけでは砂利採取をしていない13kmより上流部での河床材料の変化を説明できず、上流よりの小粒径の供給の減少があるものと考えられる。

表-3.2は黒部川における不等流計算、類似等流計算によって河床に働く平均掃流力を求め、これにより岩垣式⁹⁾によって限界掃流力を求めたものである。黒部川の流量を調べてみると、100m³/s以上の日数は、130日前後であり、200m³/sを超える日数は20日前後で、300m³/sを超える日数は年数日であり、45年2日、46年、6日あった。もし上流よりの小粒径の土砂供給が少なければ、45年、46年に粒径が大きくなるのは十分に考えられることである。

このことは河川の土砂輸送量と流量が、大きなTime Scaleで見た場合互いに独立であること、河川距離の短い急流河川では、大雨による大崩壊、人間の流域に対する活動がすぐさま河床材料に変化をあたえ、人間活動(ダム建設、山地工事、砂防堰堤)の影響をしっかりと把握しておかなければならないこと

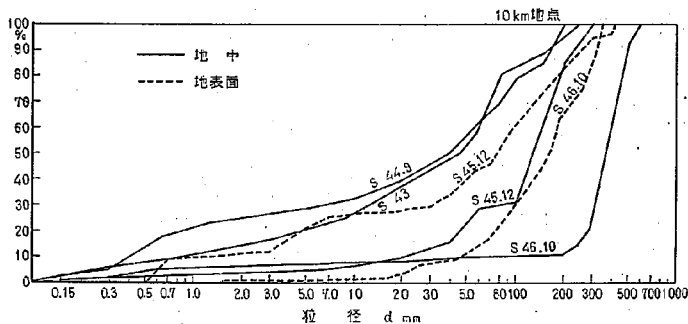


図-3.27 粒度分布 10km地点

を示唆している。

4. あとがき

本研究は、混合粒径河床の河床変動動、特にダム下流の河床低下を把握するための、手がかりとして行なったものである。2章で述べた河床表面材料調査法を、現地河川に適用することによって、混合粒径河床の河床変動特性を少なからず把握することができた。今後、現場の参考になれば幸いである。

最後に本調査解析に当って、浜松工事事務所、黒部工事事務所調査課の人々、土木研究所河川研究室島貫徹技官の助力と前土屋昭彦河川研究室長（現河川部長）の指導を受けた。深く感謝するしだいである。なおこの報告は、土木技術資料 Vol. 13-7¹⁰、15-6¹¹ でその一部が報告されている。

記 号 一 覧 表

a	: 礫の長軸径
$a(nX)$	: 一定面積 C の中で $(n-1) \Delta X < X < n \Delta X$ にある礫個数
b	: 礫の中軸径
$b(X)$	: 河床面に存在する石の粒度分布 (重量)
$B(X)$	: $b(X)$ の累加関数
c	: 礫の短軸径
d	: 粒径
d_s	: Sieve Diameter
d_{se}	: Sedimentation Diameter
d_n	: Nominal Diameter
d_k	: 評価径
$d(X)$	: ランダムに石を十分採取した時の $X=d$ の個数分布密度
$E(X)$	: $d(X)$ の累加関数
$f(X)$	: 河床面の石の粒度組成が、河床面下でも同じ組成を持っている時の粒度分布密度 (重

	量)
$F(X)$	: $f(X)$ の累加関数
l_1	: 礫の長周
l_2	: 礫の中周
l_3	: 礫の短周
$m(X)$	: $X=d$ の石が河床面に存在する個数分布確率密度
M	: 均等比
$M(X)$	: $m(X)$ の累加関数
N	: 礫本数
$S(X)$	: $X=d$ の石が河床面上に占める面積支配確率密度
W	: 礫の重さ
X	: 確率変数
ρ_s	: 礫の比重
ϕ_s	: d_n の計算方法
α	: 係数
σ	: 標準偏差
β	: a/c , 礫のかさなりぐわいによって決まる係数, 誤差率
γ	: 礫のかさなりぐわいによって決まる定数
ξ	: 空隙比
α	: 偏平度 bc/a^2

参 考 文 献

- 1) Task committee on Preparation of Sedimentation Manual Committee on Sedimentation "Sediment Transportation Mechanics: Introduction and Properties of Sediment" Proc. A. S. C. E. Hy. July 1962.
- 2) Muir, T. C.: "Sampling and Analysis of Coarse Riverbed Sediment" Proc. Mississippi Water

- Rosources Conference, 1969, pp78~83
- 3) 河村三郎, 小沢功一, 「山地河川における河床材料のサンプリング方法と粒度分布」土木学会誌 Vol. 55, 1970
 - 4) 河田龍夫, 国沢清典「現代統計学上巻第4章」
 - 5) 山本晃一, 「ダム建設による放流水の濁度変化」土木技術資料13~9 Sep. 1971
 - 6) 北陸地方建設局制定共通仕様書, 河床材料調査
 - 7) I. V. Egiazoroff "Caluculation of Nonuniform Sediment Consentration" Proc. of A. S. C. E., Hy. 4, 1965
 - 8) 土屋昭彦, 星畑国松, 本間勝一, 「河川からの流出土砂量」防災科学技術総合研究報告第26号 1971
 - 9) 岩垣雄一「限界掃流力に関する基礎的研究」土木学会論文集第41号 1951
 - 10) 山本晃一「礫河床のサンプリングと統計的处理」土木技術資料 Vol. 13-7 1971
 - 11) 山本晃一「ダム下流の河床低下」土木技術資料 Vol. 15-6, 1973および Vol. 15-8 P25 (訂正参照)

混合粒径の限界掃流力, 主に二礫混合の場合

(昭和50年8月)

山 本 晃 一*

Critical Shear Stress of Nonuniform Material Especially in the Case of Two Different Size Materials

(August 1975)

by Kouiti Yamamoto

Synopsis:

This paper presents the results of experimental investigation as to the decrease of shear stress on smaller size material due to the existence of the bigger one in the case of two different size materials for the purpose of understanding the critical Shear Stress of nonuniform river bed materials.

Key words (Critical Shear Stress, Nonuniform River Bed Materials)

要 旨

本報告は混合粒径河床の限界掃流力を知るために, 大小二粒径からなる単純な河床を想定し, 大粒径礫の存在によって小粒径に働く掃流力の減少を量的に把握するために行った実験結果を述べ, 多粒の河床の場合のアプローチとするものである。

キーワード (限界掃流力, 混合粒径)

目 次
まえがき.....(1)
1. 均一粒径の限界掃流力.....(1)
2. 二礫混合の場合の限界掃流力.....(2)
(1) 実験装置および実験概要.....(2)

[2] 砂面に働く有効せん断力.....(2)
[3] 実験結果および考察.....(3)
3. 多粒からなる混合粒径の限界掃流力.....(6)
あとがき.....(8)

まえがき

従来, 河床の変動を予測するにあたって, 流砂量公式として土研公式¹⁾, Einstein 公式²⁾ などが使われ成果を上げてきた。しかしこの河床の変動の計算も, 河床が混合粒径である場合には問題点があり, 特にダム下流等上流からの供給土砂量がストップしたような場合, 河床砂の混合特性が河床変動に大きく作用し, 各公式を修正していかなくてはならない。

Einstein 公式は一応混合粒径河床でも, 混合粒径による効果をしゃべい係数³⁾で表われ流砂量が計算できるようになっている (この点について神谷⁴⁾や平野⁵⁾は Einstein の与えた値より小粒径では小さくなる と言っている)。また土研公式を, 小粒径に対して小粒径の限界掃流力が増すと考えて流砂量計算を平野⁶⁾は行っている。

混合粒径河床の流砂量を知るためには, 河床面に働く掃流力と各々の粒子の力のつり合を知る必要があると思われる。本報告では混合粒径河床と言っても, 大小二粒径からなる単純な河床を想定し, 大粒径礫の存在によって小粒径に働く掃流力の減少を量的に把握し, 一般の多粒の粒径からなる河床の土砂移動特性のアプローチとする。なお一般の混合粒径河床の限界掃流力についても二三の考察をこころみた。

1. 均一粒径の限界掃流力

均一粒径の限界掃流力に因しては, Shields⁷⁾, や栗原⁸⁾の研究もあるが, 良く知られている岩垣⁹⁾の研究結果を述べると次のごとくである。岩垣は, 河床面上の粒子に働く種々の力を考察し, 均一粒径河床の限界掃流力を

* 土木研究所 鹿島試験所研究員

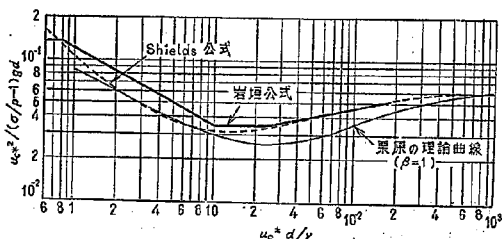


図-1 均一粒径の限界掃流力(水理公式集より)

$$\frac{u_{*c}^2}{(\rho/\rho-1)gd \tan \phi} = 1/\varphi(u_{*c} d/\nu) \dots \dots \dots (1)$$

とし、 φ を $R_{*c} = u_{*c} d/\nu$ の関数として求めた。ここで
 u_{*c} : 限界まきつ速度、 ρ : 粒子の比重、 ρ : 流体の比重、
 g : 重力加速度、 d : 粒径、 ϕ : 粒子の安息角度である。

(1)より粒子の比重2.65、 $\nu=0.01\text{cm}^2/\text{sec}$ (20.3°C

$g=980\text{cm}/\text{sec}^2$ として u_{*c}^2 を求めると、

$$d \geq 0.303\text{cm} \quad u_{*c}^2 = 80.9 d (\text{cm}^2/\text{sec}^2)$$

$$0.118 \leq d \leq 0.303 \text{ cm} \quad = 134.6 d^{31/22}$$

$$0.0565 \leq d \leq 0.118 \text{ cm} \quad = 55.0 d$$

$$0.0065 \leq d \leq 0.0565 \text{ cm} \quad = 8.41 d^{11/32}$$

$$d \leq 0.0065 \text{ cm} \quad = 226 d$$

となる。

2. 二礫混合の場合の限界掃流力

一般に山間部を流れる河川の河床材料は均一粒径でなく、大きい粒径から小さい粒径までかなり幅広い粒径を持つ混合粒径河床である。小さい粒径粒子は、大きい粒径にかくれて、小さい粒径だけの場合より動きにくく、逆に大粒径は、すき間(小粒径の存在する部分)のため動きやすくなる。このことを単純な二礫混合の河床で調べてみよう。

混合粒径河床での河床に働く力を考えていく上で、大粒径と小粒径から成る大小二粒径河床での河床に働く力を知ることは、多粒から成る河床の土砂移動特性を理解しやすくするであろう。筆者は次のような実験を行って河床に働く力について考察した。

〔1〕 実験装置および実験概要

実験は幅80cm、長さ19mの鋼製水路で行った。水路に厚さ約5~10cmに砂を敷き、その上に前もって決められた間隔にしたがってビー玉(直径 $D=2.9\text{cm}$)を規則正しく配置し、その後通水し、流量(上流の四角ゲージによって測られる)、水深、水面均配(初め水面をポイントゲージで測定したが、後には、水面変動を消すため、水路側壁を通して静圧を誘導し、この水面をポイントゲージで測った)を測定する。水路の中央8mが移動床と

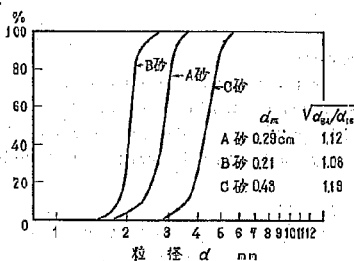


図-2 実験砂粒径加積

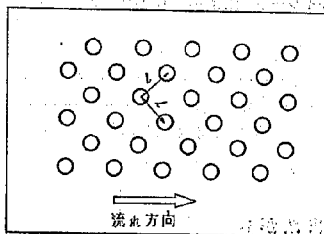


図-3 ビー玉の配列

なっており、その上流部、下流部は固定床となっている。実験砂は図-2に示すように50%粒径0.29cm(A砂)、0.21cm(B砂)、0.43cm(C砂)の三種が使用された。ビー玉は、図-3のように千鳥状に置かれた。1としてのは15cm、12.5cm、10cm、7.5cm、5cmの5種行った。

〔2〕 砂面に働く有効せん断力

良く知られているように、河床面が粗面であれば、均一粒径河床でなくても、適当な座標原点、相当粗度などを考えれば、河床近くをのぞき、

$$u/u_* = A + 5.75 \log_{10}(Z/h_s) \dots \dots \dots (2)$$

で流速分布を近似できる。ここで u は河床より Z の位置での流速、 h_s は相当粗度である。 A は河床が粗であれ

ば8.5と言われている。ここで u_{*k} は河床に働く力 τ_0 によって決まり $\tau_0 = \rho u_{*k}^2$ である。筆者の考えている河床では、 τ_0 はビー玉に働く力と砂面に働く力によって決まる河床に働く平均的な掃流力である。 τ_0^* を砂が占めている場所に実際働くまじり力とすると、ビー玉が掃流力を負担するために τ_0^*/τ_0 は1より小さくなる。これが混合粒径河床で、小粒径の限界掃流力が均一粒径河床より増大すると言われる原因である。この限界掃流力とは、河床面に平均に働く力で、小粒径砂に實質に働いている力とは異なったものである。

ここで τ_0 と τ_0^* の関係について考えてみよう。

次のような単純な仮定下で考えていこう。

イ) 大粒径(ビー玉)は動かない。

ロ) 図-5のように球の背後の死水域では、有効せん断力 τ_0^* が働かない。

ハ) 大粒径の側面では、流速が速くなり、掃流力が増すが、すぐ局所的な深掘れを起し、まわりの掃流力とはほとんど変わらない状態に落ちつくと考え。

図-4のような水路を考え、①、②断面間に働く力の釣合を考える。また流れは十分に発達し、対数流速分布が成り立つものとする。流れが定流とすると、

$$\sum C_D \frac{1}{2} \rho U_d^2 \cdot A_d + \tau_0^* (A - A_{loss}) = \tau_0 A \quad (3)$$

ここで、 N ；①～②断面間の大礫個数、 C_D ；礫の抗力係数、 A ；①～②断面間河床面積、 A_d ；礫に流体力が作用する断面積、 A_{loss} ；礫によって生じる死水域、 U_d ；礫の突出高 y_0 に相当する高さの所の流速である。(3)式は左辺第一項の礫に作用する力と、第二項の砂面に作用す

るせん断力の和が、右辺の河床に働く平均せん断力と等しいという関係を表わしている。(3)式をAで割ると

$$1/2 \rho \sum C_D U_d^2 A_d / A + \tau_0^* (1 - A_{loss}/A) = \tau_0 \quad (4)$$

となる。
今礫の河床面での存在状態が、その重さと砂の支持力、流体力によって、突出高(砂面より) y_0 で釣合状態にあると考え、 A_{loss} は大礫の流れに対するしゃへい面積に比例すると考えられると

$$A_{loss}/A = C_1 \frac{\pi}{4} D^2 N/A$$

$$= C_1 \pi D^2 N/4A \quad (5)$$

D は礫の直径、(5)式の C_1 は、 $R_1 = U_d \cdot y_0 / \nu$ と y_0/D の関数と考えられるが、筆者らの実験の範囲の R_1 数 (6×10^3 から 10^4) では球の抵抗係数がほとんど一定の範囲であり、渦核の形の相似性が成立する範囲と考えられているので y_0/D のみの関数と考えられる。

また

$$\sum A_d/A = C_2 \frac{\pi}{4} D^2 N/A = C_2 \pi D^2 N/4A \quad (6)$$

で C_2 は y_0/D の関数である。また $S = A/N$ 、 $F = \pi/8 \cdot D^2$ (1個の礫に流体力が作用する断面積を表現するもの) とすると

$$P = S/F = A/N \cdot 8/\pi D^2 = 8A/\pi N D^2 \quad (7)$$

は河床上の礫の相対密度²⁾を表わす指標となる。

河床近くの流速分布を(2)式で表わすには礫による流れに対する攪乱があり問題があるが U_d は $Z = y_0$ を代入して

$$U_d = (8.5 + 5.75 \log_{10} y_0/k) \cdot u_{*k} = a_k \cdot u_{*k} \quad (8)$$

ここで、河床面をどこに取るかが問題であるが、足立²⁾のいば型粗度の実験などから考えて筆者の実験の P の範囲では砂面を河床面としても問題はないと思われる。

(5)、(6)、(7)、(8)式を(4)式に代入して

$$C_2 C_D \rho u_{*k}^2 \cdot a_k^2 / P + \tau_0^* (1 - 2C_1/P) = \tau_0 \quad (9)$$

$\rho u_{*k}^2 = \tau_0$ であることを考えて

$$L = \tau_0^* / \tau_0 = (P - C_2 \cdot C_D \cdot a_k^2) / (P - 2C_1) \quad (10)$$

$\tau_0^* = \rho u_{*k}^2$ とすると(10)式より

$$u_{*k} = u_{*k0} / \sqrt{L} \quad (11)$$

となる。結局 L は C_2 、 C_1 、 C_D が y_0/D の関数と考えられるので P と y_0/k と y_0/D の関数と考えられる。

[3] 実験結果および考察

(1)式を確かめるために表-1の5種の P で実験を行ったが、 C_1 、 C_2 、 C_D 、 y_0 の評価をしておかなければならない。

○ y_0 について

y_0 は1ケースごとに20～25個のビー玉を砂面(局所的な深掘れを生じていない所)からの突出高を計って求めた。図-6は限界掃流力時(しばらく通水し、ビー玉のま

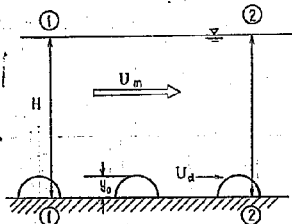


図-4

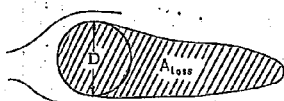


図-5

表-1

l cm	15.0	12.5	10	7.5	5
S	22.5	156.3	100	56.3	2.5
P	68.23	47.3	30.29	17.02	7.57

わりに局所的な深掘れの生じたもので、砂面の砂が働き始める状態の P と y_0 （1ケースごとに平均した値）を示したものである。 y_0 はかなり散らばりがあるが、粒径の小さい方が y_0 が小さく、 P によってそれほど変動していない。ビー玉を砂面に設置する時には、平らに敷きならされた砂面に、ビー玉が半分ぐらいうめこむように置いたが、砂の粒径によって突出高 y_0 が異なり、 P によってあまり変化しないということは、限界持流力時のビー玉のまわりの深掘れが砂の粒径に関係することを示している。 y_0 として平均を取って

$$d_m = 0.44 \text{ cm の時 } y_0 = 1.86 \text{ cm}$$

$$d_m = 0.29 \text{ cm の時 } y_0 = 1.80 \text{ cm}$$

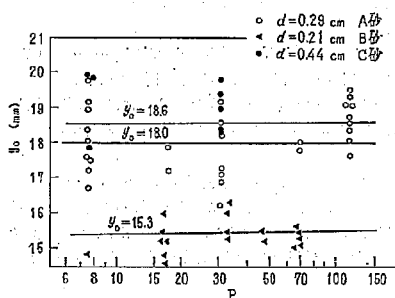
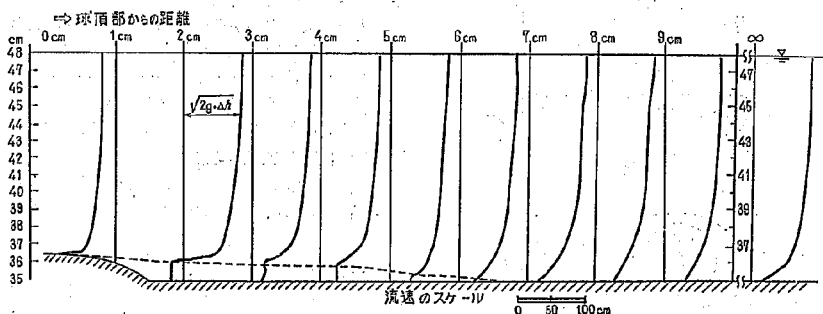
図-6 y_0 の P による変化

図-7 球の背後の流速分布

$$d_m = 0.21 \text{ cm の時 } y_0 = 1.53 \text{ cm}$$

とする。

• C_2 について

$$d_m = 0.44 \text{ cm の時 } y_0 = 1.86 \text{ cm より}$$

$$C_2 = 1/2 + (2.9 + 2\sqrt{1.45^2 - (1.86 - 1.45)^2})$$

$$\times (1.86 - 1.45) \div 2 + (3.14 \times 2.9^2 \div 4) = 0.68$$

$$\text{同様に } d_m = 0.29 \text{ cm の時 } C_2 = 0.65$$

$$d_m = 0.21 \text{ cm の時 } C_1 = 0.58$$

• C_1 について

C_1 の値の詳細な値を求めることは、後流に関する詳しい実験が無いことから不可能であるが、筆者の実験範囲の球のレイノルズ数 $Re = U_0 d / \nu$ では、球の抗力係数は一定の範囲と考えられ、 C_1 は y_0 の高低によってのみ変化する値と考えられる。筆者は次のような測定を行って C_1 の評価を試みた。 $d_m = 0.29 \text{ cm}$ の河床上に、ビー玉を一つ置き、その背後の流速を流れ方向 1 cm 間隔に垂直方向の流速分布をビトー管によって測定した。図-7はビトー管の動圧と静圧の差 Δh より $\sqrt{2g\Delta h}$ の変化を図示したものである。死水域ではマンローターに現われる静圧、動圧は実際の静圧、動圧ではなく、この図は直接流速を表わしていない。この図より $\sqrt{2g\Delta h}$ が急変する点線以下を死水域の領域として良いだろう。この試験の場合 $y_0 = 1.60 \text{ cm}$ であり、ほぼ半球の状態でビー玉が河床面に存在している。それゆえ死水域が球の中心を通る軸に軸対称であると考えると、図-7の点線以下の面積を2倍し、ビー玉の存在領域を加えて $A_{\text{loss}} = 17.43 \text{ cm}^2$ となり

$$C_1 = 17.43 / (3.14 \times 2.9^2 \div 4) = 2.64$$

となる。A砂、B砂、C砂に対する平均的な C_1 は2~3と考えられる。なおビー玉間の距離の短い $P = 7.57$ の時、流れの方向では一つのビー玉から次のビー玉までの距離は7.07 cmあり、死水域の互いのかさなり合いはは

とんど無いと考えられる。

○相当粗度 k_s について

相当粗度 k_s は、流速分布を測定し、片対数紙上に表わせれば、その直線部分を延長して $u=0$ の交点を Z_0 とすれば $k_s=30.2 Z_0$ として求まる。また k_s はエネルギー勾配 I_e より $u_*=\sqrt{g H I_e}$ を求め

$$V_m/u_* = 5.75 \log_{10}(12.27 H/k_s) \dots (12)$$

より求めることもできる。 V_m は平均流速、 H は側壁の影響を取除くため Einstein の方法によって補正した補正水深である。 H_0 を実測水深とすれば、

$$H = H_0(1 - 2R_w/B_0) \dots (13)$$

$$R_w = (N_w \cdot V_m / \sqrt{I_e})^{1.5} \dots (14)$$

である。 B_0 は水路幅、 N_w は側壁の Manning の粗度係数 (0.014)。図-8、図-9 に P の変化に対する k_s の変化を示した。ここで速度勾配と書いてあるのは速度勾配より I_e を求めたもの、横と書いてあるのは水路側壁より静圧を誘導し、その差より I_e を求めたもの、水面と書いてあるのは直接ポイントゲージで水面勾配を測定し、 I_e を求めたものである。なお水面勾配の測点間隔は 4 m とした。図をみるとこの実験の P の範囲内では、 P の減少につれて k_s は増加傾向にあり、河床砂の粒径が小さければ同一 P に対して k_s は小さくなる。点のばらつきは多く、特に水面勾配より求めた k_s はばらつきが大きい。流速分布より求めたものは値がまよる傾向にあり、水面勾配より求めた値はかなりの測定誤差を含んでいると考えられる。

足立りによると、イボ型粗度の場合、相当粗度は

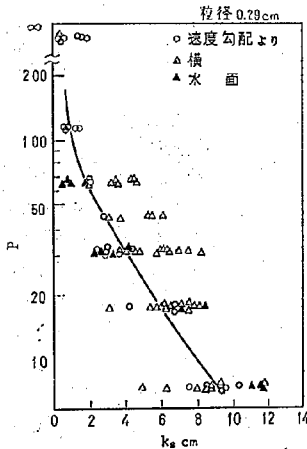


図-8 k_s V.S. P 粒径 0.29 cm

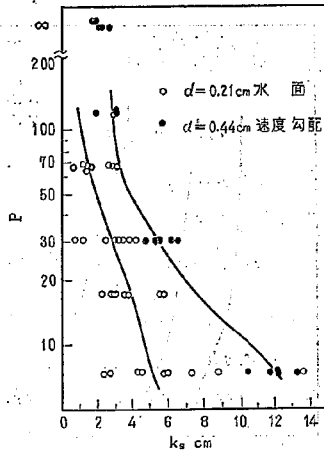


図-9 k_s V.S. P

$$k_s/h_s = 98.4 (S/F)^{-0.94} (R/h_s)^{-0.81}$$

としている。 h_s はイボ型粗度高、 R は径深、筆者の実験の場合、粗度の密度 (S/F) と水深の影響 (R/h_s) の値のほか、砂面の抵抗を表わす因子が加わるはずである。それらの相互関係は、測定精度の問題、測定量の少なから明確ではない。筆者の実験は水深 12~17 cm の間で行われ、水深 H の影響はそれほど大きくないと思われる。速度勾配より求めた k_s を重く見て図中の曲線をもって k_s と P の関係としておく。

○砂面に働くせん断力

砂面に働く有効せん断力 τ_0^* と河床に働く平均せん断力 τ_0 の比 L は、直接求めることはできない。次のように考えて τ_0^*/τ_0 を求めることにした。河床面の砂が動き始める限界は、 τ_0^* が砂を動かせる限界掃流力状態になった時である。この時の τ_0^* を τ_0^* とすると、 τ_0^* は筆者の実験範囲の P では P が変わっても $P=\infty$ における時の限界掃流力とほとんど同じ値と考えられる。よって砂の動き始める時の τ_0 を求め、それを τ_0 とし、 $P=\infty$ における τ_0^* との比を求めれば L と考えられる。つまり図式において u_{*0} を $P=\infty$ における限界まさつ速度にとれば、図式は P の変化に対する砂の動き出す時のまさつ速度 u_{*0} を求めることになる。もし球の存在状態が限界掃流力状態と変らず、 R_e 数によって C_D の値が変わらないような R_e 数の範囲では、

$$L = \tau_0^*/\tau_0 = \tau_0^*/\tau_0$$

と考えると良いだろう。

図-10 は限界掃流力状態時の P に対する $u_{*0} = \sqrt{\tau_0/\rho}$

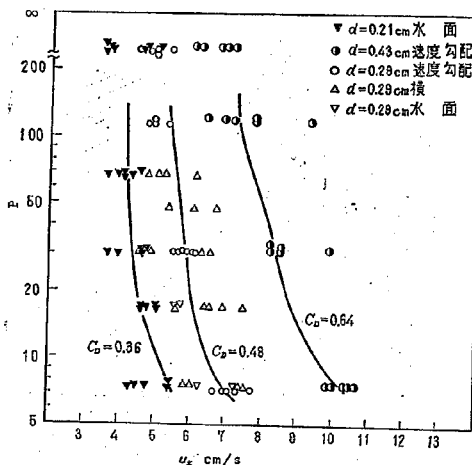


図-10 限界掃流力

の変化を示す。 P の増加につれて u_{*c} の値は大きくなり、大粒径（ビー玉）の増加によって、砂が動きにくくなっていることがわかる。

・実験値と式の比較

実験値と式を比較するに当たって、もう一つ C_D の値を明らかにしなくてはならない。 C_D の値は速度勾配の無い流れの中に置かれた球の場合、 $R_e = UD/\nu$ の関数として求まっていて、 R_e が 10^4 から 2×10^5 まではほぼ0.44である。図-11の右図のような場合、W. S. Chpil¹¹⁾によって直接測定され、 $y = 0.5D$ の速度を使うと $C_D = 0.121$ となる。ところで筆者の実験の場合、図-11の左図のごとく、および図-12の写真のように球のまわりで局所的な洗掘があり、 C_D の値としては球だけの形の抵抗のみならず、球の周りの凹凸も抵抗に入っていると考えられる。図-10に合うように C_D と C_L を選べば

$C_L = 2.0$ とすると

A砂 $C_D = 0.44$, B砂 0.33, C砂 0.6

$C_L = 2.5$ とすると

A砂 $C_D = 0.48$, B砂 0.36, C砂 0.64

である。砂の粒径の大きい方が C_D の値が大きくなり、これは y の高さの違いによるものと思われる。図-10には $C_D = 2.5$ とした場合の式による計算値を図中の曲線で示した。

正確な値を決められない定数(C_L と C_D)が二つあり(1)式を正確には検証できないが、二礫混合の場合の河床面に働く力関係をかなり説明しえたと思われる。なお、二

礫混合の場合、二礫の表面に存在する割合のみならず、二礫の位置関係(%)によって小粒径の移動限界が大きく変化することを注意しておく必要がある。

3. 多粒からなる混合粒径の限界掃流力

1.において均一粒径の限界掃流力、2.において大礫の存在する場での小粒径の限界掃流力について述べ、大礫の効果をかなり明らかにすることができた。ここでは多粒からなる河床の粒径別の限界掃流力について二、三考えてみる。

混合粒径河床の限界掃流力についてはEgiazoroff¹²⁾の詳しい研究があるが、そこでの考え方の問題点を明らかにするために、少し違ったアプローチの仕方で、Egiazoroffの考え方を再構成してみよう。

Albert R. Le Feuvre¹³⁾等は、均一粒径河床砂の移動限界状態を表わすのに、基準面よりの高 $Z = ad$ の速度 u を使っている。この考えを使うと後の議論の展開がわかりやすいのでこの考えを使用する。

図-13のように角度 α を持った河床を考えると、

$$\text{抗力 } F_D = C_D \cdot k_1 \cdot d^3 \rho u^2 / 2 \quad (15)$$

$$\text{揚力 } F_L = C_L \cdot k_2 \cdot d^3 \rho u^2 / 2 \quad (16)$$

筆者の実験の場合

W.S. CHEPELの場合

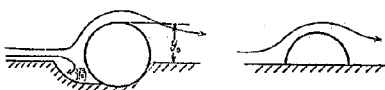
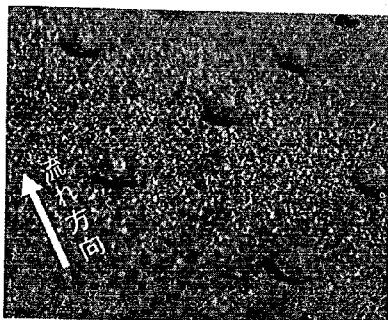


図-11 球の存在状態

図-12 ビー玉の存在状況の例 ($I = 12.5\text{cm}$)

石の水中重量 $W = k_2(\rho_s - \rho)gd^3 \dots\dots\dots(17)$

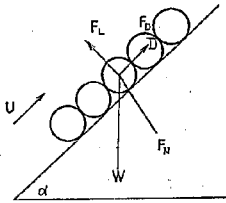


図-13

より, 砂粒子の動き出す境界状態では, 砂のまさつ角度を ϕ として

$$\tan \phi = (F_D - W \sin \alpha) / (W \cos \alpha - F_L) \dots\dots\dots(18)$$

となる。ここで k_1, k_2, k_3 は粒子の形で決まる係数である。(18)式に(14), (15)式を代入して変形し, 境界状態での u を u_c とすれば,

$$\frac{u_c^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd} = \frac{2k_3(\tan \phi \cos \alpha + \sin \alpha)}{k_1 + k_2 C_L / C_D \tan \phi} \left(\frac{1}{C_D} \right) \dots\dots\dots(19)$$

水平床の場合

$$\frac{u_c^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd} = \frac{2k_3 \tan \phi}{k_1 + k_2 C_L / C_D \tan \phi} \left(\frac{1}{C_D} \right) \dots\dots\dots(20)$$

となる¹⁰⁾。河床近くの速度は変動成分を持ち, 境界状態では, u_c は $Z=ad$ の所の流速の平均値 $\bar{u}_a$ より速い。よって流速の変動を考えて $u_c = \beta \bar{u}_a$ とし(20)式に代入すると

$$\begin{aligned} \bar{u}_a &= \frac{1}{\beta^2} \sqrt{\frac{2k_3 \tan \phi}{k_1 + k_2 (C_L/C_D) \tan \phi} \left(\frac{1}{C_D} \right) (\rho_s/\rho - 1)gd} \\ &= \frac{C}{\beta^2} \sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd} \cdot \sqrt{d} \dots\dots\dots(21) \end{aligned}$$

となり, 境界状態を $Z=ad$ の所の平均速度で表わしたことになる。ところで $R_* = u_* d / \nu > 120$ の場合 C_L, C_D は一定と考えられ, β もまた一定と考えられる¹¹⁾。よって(21)式の C/β^2 は, 均一粒径河床なら粒径によらず一定と考えられる。 C/β^2 の値は次のごとくである。今河床面の流速分布が Prandtl の対数流速分布が成立すると

$$\bar{u}_a = u_* (8.5 + 5.75 \log Z / k_s)$$

均一粒径河床の場合には $k_s = d, Z = ad$ として境界状態では

$$\bar{u}_a = u_* (8.5 + 5.75 \log a) \dots\dots\dots(22)$$

Shields¹¹⁾によれば, $R_* > 120$ では

$$u_*^2 / (\rho_s/\rho - 1)gd = 0.06 \dots\dots\dots(23)$$

よって

$$\begin{aligned} \bar{u}_a &= \sqrt{0.06 \cdot (\rho_s/\rho - 1)gd} \cdot \sqrt{d} (8.5 \\ &\quad + 5.75 \log a) \dots\dots\dots(24) \end{aligned}$$

となり

$$C/\beta^2 = \sqrt{0.06} (8.5 + 5.75 \log a) \dots\dots\dots(25)$$

となる。

混合粒径河床の場合, 均一粒径河床の場合と河床近くの乱れ特性が異なるが, (25)式を持って境界状態を表わそう。つまり粒子に当る速度が境界値を越えると粒子は動きだすと考ええる。混合粒径河床の河床近くの流速分布にも対数分布則が成立するとし, 任意の粒径 d に当る平均流速を

$$a = u_* (8.5 + 5.75 \log ad / k_s)$$

とすると境界状態では

$$\begin{aligned} C/\beta^2 \cdot \sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd} \cdot \sqrt{d} &= u_* (8.5 \\ &\quad + 5.75 \log ad / k_s) \dots\dots\dots(26) \end{aligned}$$

変形して

$$\frac{u_*^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd} = \frac{C^2/\beta^4}{(8.5 + 5.75 \log ad / k_s)^2} \dots\dots\dots(27)$$

混合粒径河床の k_s を平均粒径 $d_m, a = 0.63$ と(27)式を代入すると

$$\frac{u_*^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd} \approx 0.01 / (\log 19d / d_m)^2 \dots\dots\dots(28)$$

となり, I. V. Eglazoroff¹²⁾が表わしたものと同一の式になる。この式の実験的検討は, Pantelopoulos, Oumarov, Rametta, Nizery and Bradeav¹³⁾, 平野⁴⁾などが行い, 図-14の結果を得ている。ここで3本の破線は, (27)式の右辺の値を0.06, 0.05, 0.04の三つに要えた時の(27)式に対応する曲線である。平野の実験結果は(27)式で

$$u_*^2 / (\rho_s/\rho - 1)gd = 0.04$$

として考えた曲線に近い。境界掃流力状態の判定は文献¹⁴⁾の人達の場合, 説明していないので良くわからないが, 平野の場合次のように判定している。彼は境界掃流力を流砂量との関連において定義し, 粒径別流砂量を測定し

$$[q_{ad} / u_* d \cdot i_h] / [u_*^2 / (\rho_s/\rho - 1)gd] = 0.2 \dots\dots\dots(29)$$

なる点の u_* をもって粒径別境界掃流力としている。ここで i_h は河床砂に粒径 d のものが占める割合 q_{ad} は粒径 d の単位幅流砂量である。これは, 流砂量公式に, 佐藤,

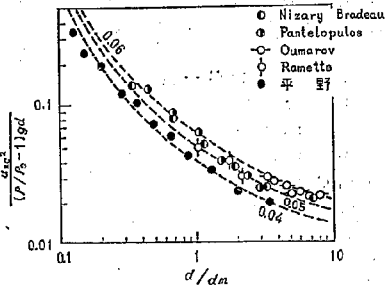


図-14

吉川、芦田公式¹⁾を使用した時に $u_{*0}=u_{*c}$ の時の流砂量に相当している。流砂量から限界掃流力を定義したものが、同じように、式で表わせるということは、式において粒度分布の効果が単に d だけであることより、粒径 d の石が存在する河床面積の全面に掃流力が働いていることを示し、2.二礫混合の限界掃流力で述べた、大礫による死水域の存在の影響は少ないということを示している。河床砂の粒度分布が連続で、粒度分布形もある範囲の中でのみ死水域の影響は少ないと考えるべきであろう。また式は、河床面における砂礫の存在状態を決めているが粒度分布の違いによって河床面における個々の粒径の存在状態も変わるものと考えられる。混合粒径河床の相当粗度を k_s 平均粒径 d_m としていることにも問題があり、粒度分布、砂礫の河床面での存在状態による k_s の換對をより進めなければならない。また小粒径に対しては、均一粒径に対する C/P^3 を取ることに問題があり、混合粒径では乱れのスケールがより大きい粒子で決まってしまうことから、小粒径では乱れの影響 β が大で動きやすくなっていると考えるべきであろう。また河床面近くの流速分布を対数分布則とすることも小粒径に対して問題が残る。これらの問題の解決には、河床面近くの乱流構造、河床面での混合砂の存在状態を把握していくことが必要であり、混合粒径の限界掃流力の表示には、河床材料の粒度分布を表現するパラメーターをどう組みこんでいくかが今後の課題となろう。

あとがき

混合粒径河床の河床変動を解明する手がかりとして、主に二礫混合河床における限界掃流力を論じたが、その成果を、多粒からなる混合粒径河床の土砂移動特性にうまく論旨を展開できなかった。筆者としては十分に満足のいく報告とはなりえなかったが、今後の研究のためにあえて報告したしだいである。

なお本実験、解析に当って、河川研究室、島貫徹技官の多大なる助力を受けた。また本研究は土墨昭彦河川部長の指導を受けた。深く感謝するしだいである。

記 号 一 覧 表

A	面積
A_d	礫に流体力が作用する断面積
A_{loss}	礫によって生じる死水域
C, C_1, C_2	係数
C_D	抗力係数
d	粒径
D	ビー玉の直径
d_m	平均粒径
F	$F = \pi/8 D^3$

F_D	抗力
F_L	揚力
g	重力加速度
H	水深
I_e	エネルギー勾配
i_b	河床砂に粒径 d のものが示める割合
N	A の中にある礫個数
N_m	側壁の maning の係数
h_s	相当粗度
L	$L = \tau_0^*/\tau_0$
P	$P = S/F$
q_{Bd}	粒径 d の単位幅流砂量
R_e	レイノルズ数
S	$S = A/N$
u	速度
u_*	まさつ速度
u_{*c}	限界まさつ速度
U_d	礫頂に当る流速
V_m	流速
Z	基準面よりの高さ
W	粒子の水中重量
τ_0	河床に働く平均掃流力
τ_0^*	砂の示める場所に働く掃流力
ξ	しゃへい係数
ρ_s	粒子の密度
ρ	水の密度
ϕ	粒子のまさつ角度
ν	動粘性係数
β	乱れに関する係数

参 考 文 献

- 1) 佐藤清一、吉川秀夫、芦田和夫「河床砂礫の掃流運動に関する研究」土木研究所報告第101号 1954
- 2) H.A. Einstein "The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flow" U. S. Dept. of Agr. Tech. Bull 1026, 1950
- 3) 神谷隆多郎「流送土砂調査」昭和38年度報告書、土木技術資料4-11
- 4) 平野宗夫「armoring をともなう河床低下について」土木学会論文集第195号 1971年1月
- 5) H. Roose "Engineering hydraulics, John Wiley & Sons" 1949, P. 789
- 6) 栗原道徳「限界掃流力に就いて、九大流体工学研究所報告」第4巻、第3号、1948
- 7) 岩垣雄一「限界掃流力に関する基礎的研究」土木学会論文集第41号 1951

- 8) 足立昭平「人工粗度の実験的研究」土木学会論文
集第41号，1951
- 9) W. S. Chepel "The Use of Evenly spaced
Hemispheres to evaluate Aerodynamic Forces
on Soil Surface" Trans. A. G. U. vol. 39 No. 3
1958
- 10) Albert R. Le Feuvre, M. ASCE, Hilmi P. Altinbilek, A. M. ASCE, and Marion R. Cartens
"Sediment Pick up Function" Proc. A. S. C. E.
Hy 1970
- 11) I. V. Egiazoroff "Calculation of Nonuniform
Sediment Constraitions" Proc. of A. S. C. E.
Hy4, 1965

ダム下流の河床低下に関する研究

(昭和50年8月)

山 本 晃 一*

Study on the Riverbed Degradation below Dams

(August 1975)

by Kouiti Yamamoto

Synopsis:

Sediments below dams are generally composed of nonuniform bed materials which lead to an armoring and static equilibrium condition of the bed in the final phase of the river bed degradation process.

This paper mainly presents an experimental investigation carried out in order to estimate the river bed degradation below dams.

Key words (Armoring, Degradation of River Bed)

要 旨

ダム下流の河床材料は一般に混合粒径からなる。ダム下流の河床低下の過程において、混合砂礫は、流水による分級作用を受け、アーミングが進み、河床は静的平衡状態におちつく。

本報告は、ダム下流の河床低下量を推定するために行った実験を主に報告するものである。

キーワード (アーミング, 河床低下)

目	次
まえがき.....(1)	4. 簡易な河床低下量の推定法.....(4)
1. ダム下流の河床低下量推定法に関する 従来の研究.....(1)	5. 混合粒径河床の河床変動実験.....(4)
2. parallel degradation と rotational degradation(2)	[1] 実験装置および実験概要.....(4)
3. ダム下流の河床低下量に影響をあたえ る要因.....(3)	[2] 実験結果.....(5)
	[3] 簡易式の問題点および今後の課題.....(12)
	あとがき.....(12)

ま え が き

大ダムを建設するような河川上流部においては、河床材料は、大粒径を含む混合砂から成る。このような場所
にダムを建設すると、ダム下流では上流から供給される
土砂がダム貯水地に堰止められてしまうため、河床が低
下する。この河床低下の過程において、河床砂礫は流水
による分級作用を受け、河床砂礫が次第に粗くなり、河
床の低下が進まなくなる。この現象をアーミングとい
い、表層の粗い層をアーマコートと言う。この河床低下
は、安定した河道を作り、洪水時の水位を下げるとい
う面もあるが、取水の困難、橋脚、護岸の洗掘倒壊など害
的側面も生じる。この河床低下を推定しておくことは、

河道計画上必要なことである。

本報告は、この河床低下を支配する要因について考察
し、河床低下量の推定法について調査研究したものであ
る。

1. ダム下流の河床低下量推定法に関する従 来の研究

今までにも、ダム下流の河床低下量の研究はかなり行
われてきた。これらの研究のアプローチの仕方を見てお
くことは、必要なことであろう。大別して三つの方向が
あるようである。

- ① 河床の土砂の移動量の連続条件より河床低下量を
推定していく。
 流砂の連続式

* 広島試験所研究員

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial(q_s \cdot B)}{\partial x} = 0 \dots \dots \dots (1)$$

と流水の運動方程式、河床材料がしだいに粗くなっているために、 q_s が同一掃流力でも変化する混合粒径河床の流砂量式を元にして考えていく方法である。ここで q_s : 単位掃流砂量, B : 川幅, λ : 空隙比, Z : 河床高, t : 時間, x : 距離である。

E. W. Lane¹⁾は、流水によって運ばれる河床材料は河床表面からある限られた深さの材料であり、この移動する層を turn over zone と名付けている。さらにこの zone 内の土砂の単位時間 (Lane は1年間を取っている) における各粒径別の土砂移動量を計算し、次の年の turn over zone の厚さ内にある原河床の材料を取り入れて、新しい年の turn over zone の粒度組成を決定する方法でダム下流の河床低下量を計算している。この計算法には turn over zone の決定法、粒径別流砂量などに問題が残っていた。近年、平野²⁾は、混合砂の粒径別流砂量について検討し、粒径別流砂量式を作り、turn over zone 内の河床材料に粒径 d の占める割合 ig と、粒径別流砂量 turn over zone 内の空隙比 λ 、河床高 Z の関係式を求め、室内実験と比較して良い結果を得ている。しかし実験室内の単純な条件下の実験で、また河床材料の粒度分布も限られたものであり、実際の河川への適用にあたっては、turn over zone の決定法、粒径別流砂量などまだ問題が残っている。

②土砂の移動を確率過程としてとらえる方向

ある石がどれだけの確率で動くものか考慮し、アーマコートの粒度分布、低下量を考えていく方法で、Gessler, J.³⁾、河村⁴⁾に代表される。Gessler は河床に働くせん断力の変動は正規分布であると仮定し、個々の粒子に働くせん断力がその限界掃流力 τ_c より小さい確率を

$$q_c (\tau/\tau_c < 1) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\tau/\tau_c - 1} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \dots \dots \dots (2)$$

とした。ここで τ は平均河床掃流力、 σ は τ の変動の標準偏差、 x は τ/τ_c である。 τ_c は Shields 公式による限界掃流力である。そして初期水路床材料の粒径 d が、流水にさらされ、安定なアーマコートとして河床面に残る確率 q_s が、 $q_s = q_c$ であることを実験的に確かめ、この仮定を使いアーマコートの粒度分布、低下量を求めている。この考えには、河床に働くせん断力の変動の確率という時間的な確率がアーマコートとして残るという次元の異なる場所的な確率に等しいとする本質的な疑問が残る。たとえば、流水にさらされ、安定なアーマコートとして河床に残った表面粒度分布と同一粒度組成を初期河床材料に持つ河床に、同一条件の流水にさらせば、粒径 d の材料は $1-q_c$ だけ河床から出て、表面粒度分布は変

り、河床は低下しなくてはならない。これは明らかに矛盾している。むしろ(2)式は粒径別の流砂量と結びつける概念であろう。

③ 経験的な方法

Meville S. Prist と Adman Shindia⁵⁾は、ダム直下のダム構造物に直接影響を受けない所では、ダム下流の最終低下量 ΔZ は、平均粒径 d_m 、流量 Q 、流積 A 、河床材料の標準偏差 σ に関係するとして

$$\Delta Z/\sigma = \varphi(\sqrt{gd}/Q/A) \dots \dots \dots (3)$$

としている。無次元量 $\Delta Z/\sigma$ は、無次元量 $\sqrt{gd}/Q/A$ の関数と考えたわけである。ダムにおける実測値、実験室内での資料より φ の関数形をあてている (Q としては月平均流量の年最大値の年平均値を取っている)。しかし資料が少なく信頼性はあまり無いように思える。ただこのような方法は、河床上の土砂移動の物理的構造を解明しないが、現在の土砂水理学の段階においては、資料さえ多く集まれば有効な方法であろう。

これらの方法論のうち、ダム下流の河床変動を統一的にその力学的過程を把握するには①の方向を取らざるをえない。しかし混合粒径河床の流砂公式、turn over zone、河床の抵抗等、知らねばならぬことは多い。現状ではダム下流の河床低下現象の共通性を深く認識した③の方向を踏まえ、それを論理的に明らかにする①、②の方向で補うべきであろう。

2. parallel degradation と rotational degradation

上流から給砂の無いダム下流のような場所の河床は、与えられた流量に対して一つの安定な河床に向う。Gessler³⁾は、Willi が多くの河床低下の実験によって観測した、「アーマコートが安定に達した最終河床勾配は、実験水路にそって一定であり、一定の掃流力になる。」という結果より混合粒径河床は、一つの混合粒径としての限界掃流力 (最終河床勾配における掃流力) τ_m を持つと仮定した。そして、もし初期掃流力が τ_m より小さければ、水路は最初の勾配を持ったまま、まっすぐ速度がほとんど変化せずに河床が若干低下するとし、こういう河床低下を parallel degradation と名付けた。初期掃流力が τ_m より大きい場合には、掃流力が τ_m に等しくなるまで連続的に河床勾配を減少させていくとし、こういう河床低下を rotational degradation と名付けた。parallel degradation か rotational degradation かの指標として

$$\bar{q} = \frac{\int_{\tau_m}^{\infty} q_s \cdot p_d dh}{\int_{\tau_m}^{\infty} q_s \cdot p_d dh} \dots \dots \dots (4)$$

をあてた。 $\bar{q} > 0.5$ なら parallel, $\bar{q} < 0.5$ なら $\bar{q} = 0.5$ に

なるまで河床勾配を減少させるとした。ここで p_0 は初期河床材料の重量割合の確率密度である。

最近、芦田と道上は γ アーマコートの粒度分布および河床低下の過程は粒径別の限界掃流力に密接に関連しているとし、Egiazaroff¹¹⁾によって提案された混合砂礫の粒径別の移動限界を表わす式

$$u_{*c}^2 \tau_i / (\sigma/\rho - 1) g d_i = 0.1 / (\log_{10} 19 d_i / d_m)^2 \dots (5)$$

ここに d_m ：河床砂の平均粒径， u_{*ci} ：粒径 d_i の砂礫の限界掃流力。

を変形し、図-1の結果(5)式を変形し τ_i/τ_m と d_i/d_m の関係を示したもので、 $d_i/d_m < 0.4$ の範囲において $\tau_i/\tau_m = d_i/d_m$ の減少とともに増大している。彼らはこのような現象は実際には見られないとし図-1に示す破線の状態になるものと仮定した。ここで τ_m は平均粒径の限界掃流力)と図-2によって次のような考察を行っている。図-2の中の u_{*ci} は、あたえられた粒度分布と図-1により求まるすべての河床材料が動かない摩擦速度、 u_{*cm} は d_{95} に対する限界摩擦速度、 u_{*c} をあたえられた初期摩擦速度とすると、 $u_{*ci} > u_{*c}$ では河床礫は移動しない状態にあり、 $u_{*ci} < u_{*c} < u_{*cm}$ の場合には u_{*c} の変化は見られないが、最終河床は初期河床に平行に下がる

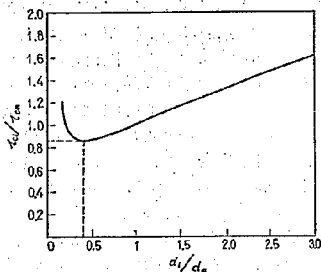


図-1 $\tau_i/\tau_m = \frac{0.1}{0.06 (\log_{10} 19 d_i / d_{ave})^2} \left(\frac{d_i}{d_{ave}} \right)$

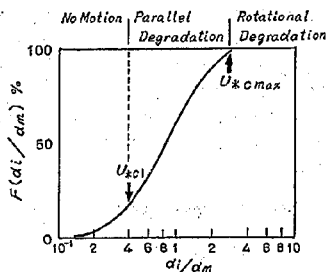


図-2

parallel degradation の領域にある。また $u_{*cm} < u_{*c}$ では全河床材料が移動の状態にあり、 u_{*c} が u_{*cm} に落ちつく方向に勾配が変化し、アーマコートは u_{*cm} によって規定される粒度分布をとるとした。(rotational degradation)ところで日本ではダム建設地点はかなり急勾配の場所にあり、河床材料はダム建設前の大小の出水によって種々の粒径を含む混合粒径である。このような地点にダムを建設した場合、貯水池の貯水作用によって、洪水の自然流下と比べ、ピーク流量が小さくなるのが普通である。もちろん将来大出水がある可能性はあるが、一方河床の最大礫は、自然流下の最大流量によって運ばれたものと考えられるから、芦田らの考えによれば、一般にダム下流の河床低下は、横からの土砂供給が無ければ、parallel degradation の領域にあると考えられよう。

3. ダム下流の河床低下量に影響をあたえる要因

ダム建設による、ダム下流の最終河床変動量は、parallel degradation の領域では、ダムからの距離に影響を受けずほぼ平行に河床が下がると思われる(もちろん川幅の変化などの影響を受けるが)。

単純な場合を想定してダム下流の河床低下量に影響をあたえる要因について考えてみよう。

対象としている河道は、川幅は一定、一定勾配、ダム直下のダム工作物による影響を受ける場所より下流で河床材料は一樣で、水面勾配と河床勾配はほぼ等しいとする。この時河床低下量 ΔZ は、次のような要因の影響を受けよう。

$$\Delta Z = f(d_m, \sigma, d_c, L) \dots (6)$$

ここで d_m 、 σ は、初期河床の平均粒径、標準偏差、 d_c は河床に働く掃流力に対応する限界粒径 d_m 、 L はダムよりの距離。parallel degradation なら、 ΔZ は L に影響をおよぼさず、次元解析より、

$$\Delta Z/\sigma = \varphi(d_m/d_c, d_m/\sigma) \dots (7)$$

と表わすことができる。つまり $\Delta Z/\sigma$ は河床材料の変動率 d_m/σ と平均粒径と限界粒径の比に関係すると考えられる。

1章で述べたように Melville S. Priest and Adam Shindala¹²⁾によると

$$\Delta Z/\sigma = \varphi_1(\sqrt{g d_m}/Q/A) \dots (8)$$

である。ところで、これは平均流速が Chezy 則にのるとすると

$$Q/A = C \sqrt{R I} = C/\sqrt{g} \cdot u_{*c}$$

よって

$$(\sqrt{g d_m}/Q/A)^2 = g^2 d_m / C^2 u_{*c}^2$$

また、 $d_c = \alpha u_{*c}^2$ と考えられるから(α は一定)、

$$(\sqrt{g d_m}/Q/A)^2 = \Omega d_m / d_c$$

ここで Ω は定数、よって

$$\Delta Z/\sigma = \varphi_n(d_n/d_c) \dots \dots \dots (9)$$

と変形でき $\Delta Z/\sigma$ は d_n/d_c だけの関数となり、 d_n/σ は含まれていない。実際の河床低下には d_n/σ は、あまり関係しないのだろうか、次章で考えてみよう。

4. 簡易な河床低下量の推定法

parallel degradation 領域において、(7)式の関数関係を求めるには、多数の実測資料、実験値を収集しなければならない。ここでは、次のような単純な考えをもちいて、(7)式の関数関係の近似形を見つけてみよう。

次のような河床混合特性を持っている河床材料を考える。河床の単位表面積において、粒径 $X=d$ を小区間 ΔX に分け、 $0 < X \leq \Delta X$ にある礫個数を $a(\Delta X)$ 、 $(n-1)\Delta X < X \leq n\Delta X$ にある礫個数を $a(n\Delta X)$ とする。また地中単位体積中において、 $0 < X \leq \Delta X$ にある礫個数を $C(\Delta X)$ 、 $(n-1)\Delta X < X \leq n\Delta X$ にある礫個数を $C(n\Delta X)$ とする。今 $X=d_c$ より小さい粒子が深さ Z_c より上で取りのぞかれ、ちょうど $X=d_c$ より大きい石が表面を S だけおとしたとすると、 Z_c の条件は次のようになる。

$$S = Z_c \cdot \beta \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} \pi/4 \cdot X_n^2 \cdot C(n\Delta X) + \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} \pi/4 \cdot X_n^2 a(n\Delta X) \dots \dots \dots (10)$$

ここで β は石の有効表面積充て率、 $n_c, n_{\max}$ は d_c/d_n の最大粒径 $d_{\max}$ に対応する n 、今空隙率を λ とすると

$$1 = \frac{1}{1-\lambda} \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} \pi/6 \cdot X_n^3 \cdot C(n\Delta X) \dots \dots \dots (11)$$

となる。ここで $X_n = (2n-1)/2 \cdot \Delta X$

また混合礫の粒度分布(重量)は、上式を使い、次のごとくあらわされる。

$$f(X_n) \cdot \Delta X = \frac{\pi}{6} \cdot \rho g \cdot C(n\Delta X) \cdot X_n^3 \\ \left/ \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} \pi/6 \cdot \rho g \cdot C(n\Delta X) \cdot X_n^3 \right. \\ = C(n\Delta X) \cdot X_n^3 \left/ \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} C(n\Delta X) \cdot X_n^3 \right. \\ = \pi/6(1-\lambda) \cdot C(n\Delta X) \cdot X_n^3 \dots \dots \dots (12)$$

また、河床面の面積支配密度(粒径 X_n の礫が河床面を支配する割合)を $S(X_n)$ とすると

$$S(X_n) \Delta X = \beta \frac{\pi}{4} a(n\Delta X) \cdot X_n^2 \dots \dots \dots (13)$$

よって

$$C(n\Delta X) = \{f(X_n) \cdot \Delta X \cdot 6(1-\lambda)\} / \{\pi \cdot X_n^3\} \\ a(n\Delta X) = \frac{4}{\pi \beta} S(X_n) \Delta X / X_n^2 \dots \dots \dots (14)$$

、(13)式を(14)式に代入して

$$S = Z_c \cdot \beta \cdot \frac{3(1-\lambda)}{2} \cdot \Delta X \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} \{f(X_n)/X_n\} \\ + \Delta X \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} S(X_n) \dots \dots \dots (15)$$

となる。よって

$$Z_c = 2/3(1-\lambda) \beta \cdot [S - \Delta X \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} S(X_n)] \\ / \left[\Delta X \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} \{f(X_n)/X_n\} \right] \dots \dots \dots (16)$$

(16)式において、表面石の粒度特性が地中と同じなら、 $S(X_n) = f(X_n)$ である⁽⁹⁾、今河床材料の粒度分布が、正規分布

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{X-X_n}{\sigma} \right)^2 \right\} \\ \text{を持つとすると、上式を(16)式を代入し変形すれば、} \\ Z_c/\sigma = \frac{2}{3(1-\lambda)} \beta \left[\sqrt{2\pi} S \right. \\ \left. - \int_{W_c}^{\infty} \exp \left\{ -\frac{1}{2} Y_n^2 (W-1)^2 \right\} X_n dW \right] \\ / \left[\int_{W_c}^{\infty} \exp \left\{ -\frac{1}{2} Y_n^2 (W-1)^2 \right\} / W \right] dW \dots \dots \dots (17)$$

となる。ここで $W=X/X_n$ 、 $W_c=X_c/X_n$ 、 $Y_n=X_n/\sigma$ 、上式は、 Z_c/σ が、河床材料の変動率 d_n/σ と d_c/d_n の関数であることを示している。もし河床低下中において、ある粒径 d_c より大きい石は動かず、それより小さい石が動き、我々が考えている河道から流下してしまい、最終的に d_c より大きい石が、河床面を S だけおとしたとすると(16)式は河床低下量 Z_c を表わすことになる。もちろん実際の河床低下過程においては、2.で述べたように、 d_c は一義的に決められるものでなく、同一粒径でも動くものもあれば、動かないものもあり、正確には、(16)式は河床低下量の推定式とはなっていない。よって、近似式と考えて次節で S の値が一定値になるか実験で確かめる。

図-3は $S=0.6$ 、 $\beta=0.7^3$ 、 $\lambda=0.5$ とした場合の(16)式の計算結果である。ここで縦軸に Z_c/σ 、横軸に d_c/d_n を取った、この図で破線は、 $d_n=20\text{cm}$ の時の低下量 Z_c を表わす。 d_c を同一粒径に対する岩垣の限界粒径に取ると、横軸は河床に働く掃流力の強さを表わす。これを見ると $\Delta Z/\sigma$ は d_c/d_n のみならず、 d_n/σ にも大きく影響を受けて、同一平均粒径、同一掃流力の条件では、河床材料の分散が大きいくほど、河床低下量が小さいだろうことを示している。

5. 混合粒径河床の河床変動実験

[1] 実験装置および実験概要

parallel degradation の領域での河床変動量を把握するために次のような実験を行った。実験水路は幅80cm、

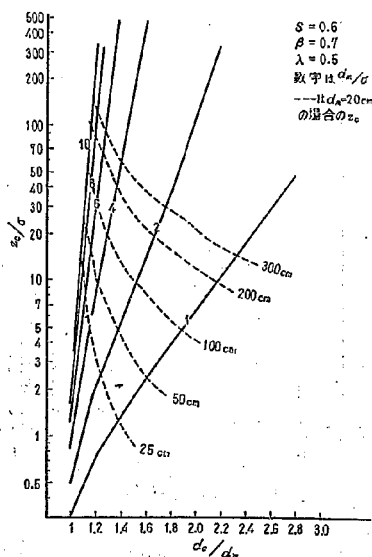


図-3 河床低下量と粒度分布

長さ19mの鋼製水路で、水路に長さ約9~10mに混合砂（コンクリートミキサーで5~6種の砂を良く混ぜ合わせたもの）を5~10cmに平らに敷きならし、上流には、大きな石（直径2.9cm）で床固めをした。また下流にも、約8cmの角材で床固めをした。実験に使用した混合砂は、図-4に示すような粒度分布を持ち、A砂（平均粒径3.28mm、均等比M5.84）B砂（平均粒径3.40mm、均等比M3.87）二種である。流量は水路上流の量水で計る。

実験の境界条件は、すべて上流端の給砂量を0、下流の水位は、水路下流端ゲート高を一定としておいた。流量は1つの実験中一定とした。

測定は、決められた時間に、水位、流速分布を決めら

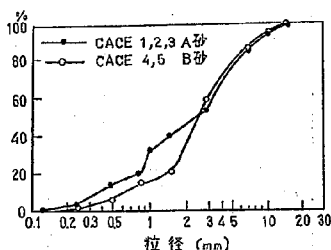


図-4 混合砂粒度分布

れた場所で測定した。また河床面の粒度分布を決められた時間に水を止め、小型ポンプで排水し、表面の石を面積格子法（適当な大きさの木枠をもちい、測定対象河床上の最大粒径以上の間隔に糸を格子状に張り、格子点下の石を採取する。採取した石の粒径 d の個数分布密度は粒径 d の石が表面をおう面積支配密度に等しい。また表面の粒度特性が地中と同じなら、面積格子法によって採取した石の個数分布は地中の粒度分布と同じになる⁹⁾）によって粒度調査を行い、その後また通水した。なお通水前に水路に水を入れ、水路内にある混合砂を水締めした。実験は5ケース行い、このうち3ケースは一つの実験終了後、流量を増して表面の粒度分布と表面下の粒度分布の異なる場合で行った。実験条件、結果を表-1に総括しておく。

〔2〕 実験結果

・河床に働くせん断力の変化

河床に働くせん断力は、水面勾配を計ることによって求めることができるが、誤差が大きいと考えられたので、流速分布を測定し、それを片対数上に表わし、その勾配より求める方法を取った。その結果が図-5から、図-9に示されている。流速はビトー管で計られ、1垂直方向に計るのに約20分を要している。これらの図中に書いてある時刻は、測定時間の平均であり ± 10 分の時間差がある。

表-1 ダム下流の河床低下実験総括表

CASE	初期河床勾配	流量 (l/sec)	平均水深 (cm)	岩径 d_s (mm)	空隙比 λ	地中 d_m (mm)	地中 M	表面初期 d_m (mm)	表面初期 M	表面最終 d_m (mm)	表面最終 M	低下量 (mm)
1		69.2	4.80	2.90	0.28	3.28	5.84	2.83	4.54	5.80	2.62	12.5
2		98.2	6.60	5.44	0.28	3.28	5.84	5.80	2.62	7.82	2.07	7.5
3		122.4	8.34	8.60	0.28	3.28	5.84	7.82	2.07	8.13	1.67	12.0
4		76.7	7.80	6.06	0.28	3.40	3.67	3.85	2.17	7.31	2.73	21.0
5		124.45	7.33	6.28	0.28	3.40	3.67	7.31	2.73	7.02	2.49	7.5

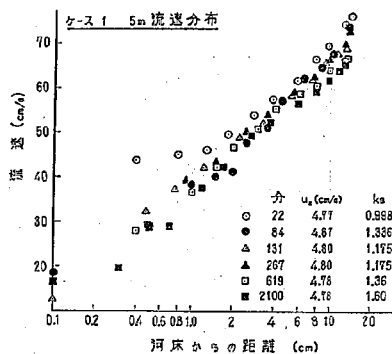


図-5 ケース1 5m流速分布

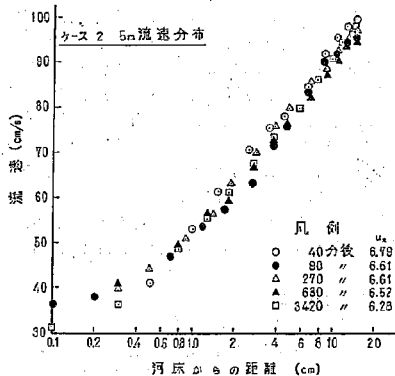


図-6 ケース2 5m流速分布

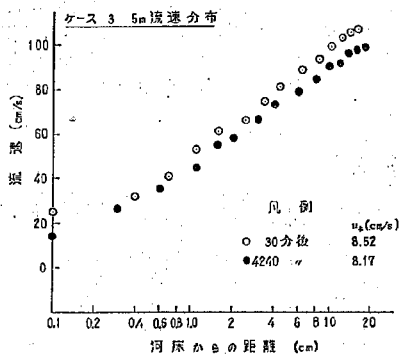


図-7 ケース3 5m流速分布

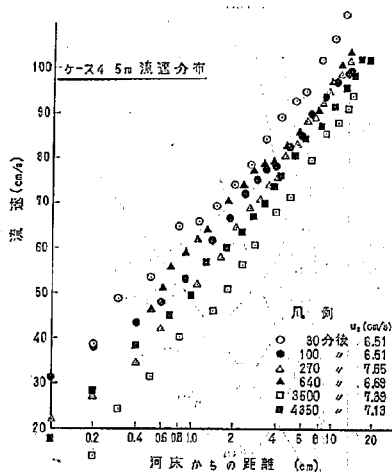


図-8 ケース4 5m流速分布

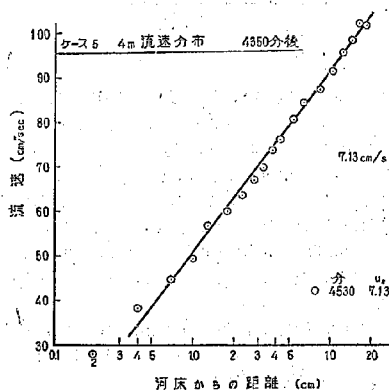


図-9 ケース5 4m流速分布 4350分後

これらの図を見ると、ケース1の22分の河床近く、ケース4の場合に多少、測定時刻による流速分布の差があるが、速度勾配の差は少なく、まさつ速度は実験中ほとんど変化しない。今まで言われているように parallel degradation では u_a の変化は少ないということが確認された。アーミングによって粒径が増し、粗度が增加するにもかかわらず u_a の変化を補えられないのは、 u_a の変化が小さく測定誤差の範囲に入ってしまうため有意な差を検出できないためと思われる。

●河床高の変化

図-10から図-14に河床勾配、水面勾配の時間的変化を示した。これを見ると下流端の床固め部分(固定床)、上流端の部分を除けば、ほぼ河床は初期河床に平行に低

下し, parallel degradation の河床変化であることがわかる。水位は河床の低下量に対応した分だけ下がらず、水深が増している。粗度の増加によって水深が増加したことがわかる。図-15には水路中央部河床低下の時間変

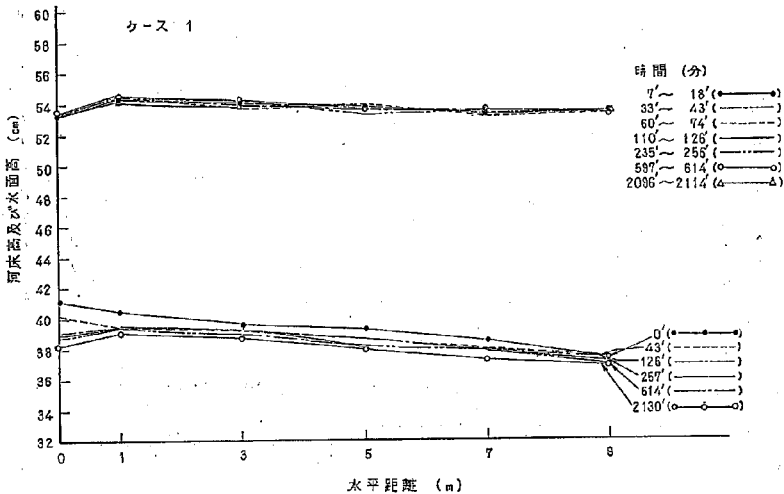


図-10 ダム下流河床洗掘 ケース 1

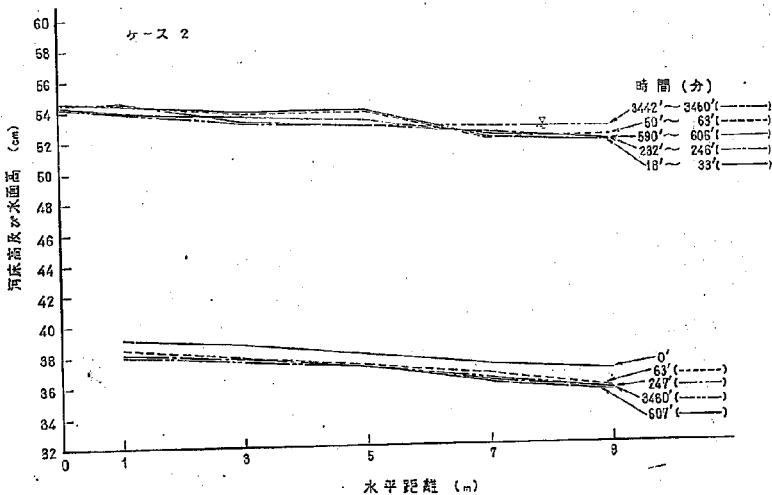


図-11 ダム下流河床洗掘 ケース 2

化を示した。

・河床表面粒度の変化

図-16から図-21に河床面の面積格子法によって採取した石の個数分布 $E(d)$ の時間変化を示した。また図-17、

図-21には表面下の石の粒度分布 $F(d)$ を地中と書いてある曲線で示した。表面の粒度特性が地中と同じであれば $F(d)$ と $E(d)$ はほぼ同じ曲線になるはずである。^{*)} ケース 1 の場合、 $F(d)$ と通水前の $E(d)$ は、ほぼ同一曲線と

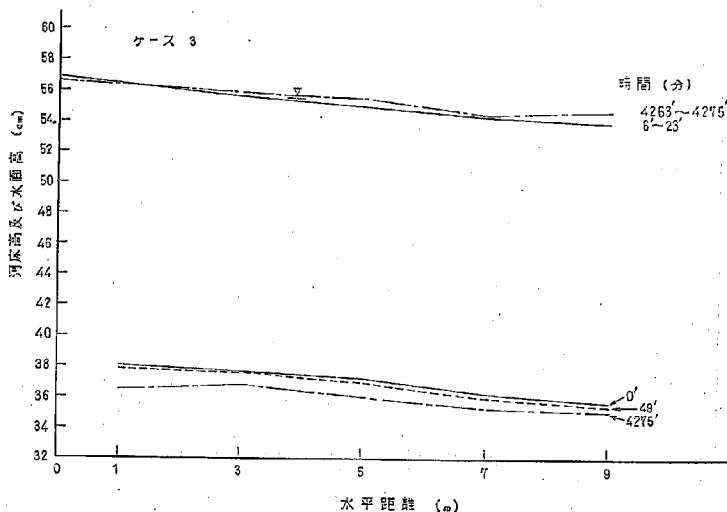


図-12 ダム下流河床沈掘 ケース 3

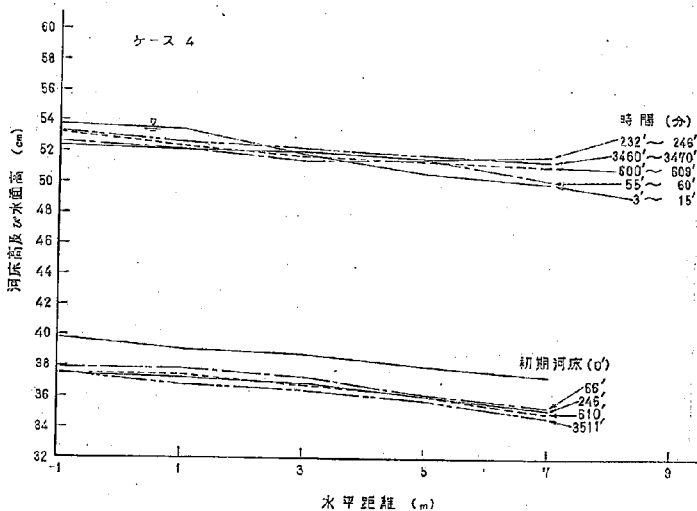


図-13 ダム下流河床沈掘 ケース 4

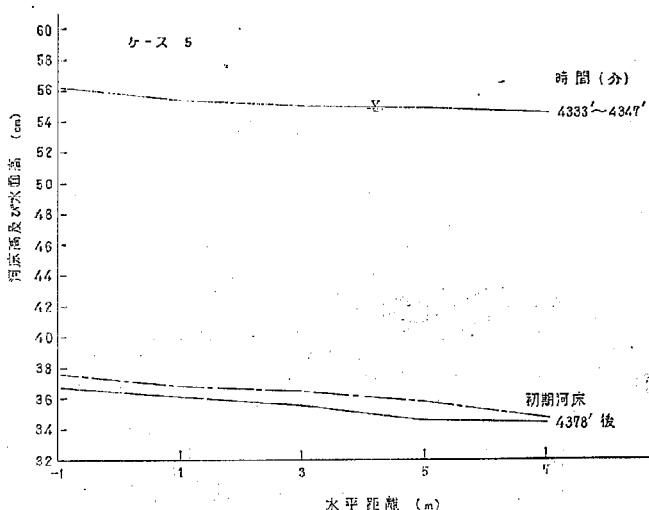


図-14 ダム下流河床洗掘 ケース5

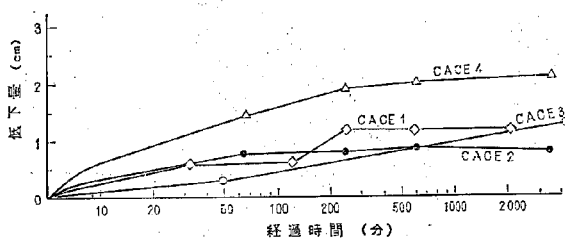


図-15 水路中央部河床低下の時間変化

なるが $E(d)$ の方が小さい粒径のものが多く、一方ケース3の通水前の $E(d)$ は小粒径が少なくなっている。これは水締め（一度水を張り、その後水をぬく）を行った際、B砂はA砂に比べ小粒径の占める割合が小さいため、水がぬける時小さい粒子が大粒子の間にすきこまれてしまい表面に小粒径の材料が少なくなったと考えられ、水締め後の表面粒度分布の異なるのが目視でも認めることができた。

各ケースとも最終アーマコートの粒度分布は、場所によらず水路に沿って、だいたい同じ粒度分布になった（ただケース5の移動床土流端より1mの所では粒度分布が異なっていた）。場所的に河床に働く掃流力がそれほど変わらない parallel degradation の実験であるから当然であろう。図-16、図-17、図-18より、表面粒度

は上流より粗くなり、徐々に下流に向って同一粒度分布を形成していくのがわかった。

⑥式の検討

図-22は、⑥式によって d_s を変化させた時の S の値の変化を示したものである。ここで Z_s , $S(X_n)$, $f(X_n)$ は各々の実験ケースの値を取り、 λ は実測値0.28, $\beta=0.7^{81)}$ として計算した。もし適当な d_s を取った時、どの実験ケースにおいても S が一定値を取れば⑥式は半理論式として河床低下量を表わす簡易式として都合が良い。 d_s として均一粒径に対する限界掃流力（岩垣式）を取った時の S の値を・印で示した。ケース1を除き S は0.6前後である。ところでケース1の場合、⑥式によって初期表面粒度と粒度分布（ $t=0$ の時 $E(d)$ ）として持つ混合粒径の移動限界粒径を Egiazaroff の式に従って

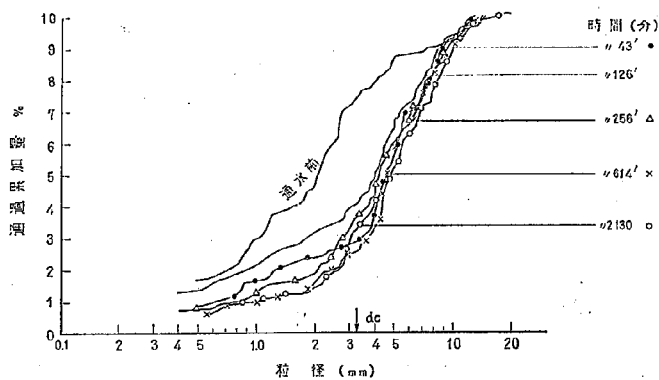


図-16 2m表面粒度曲線 ケース1

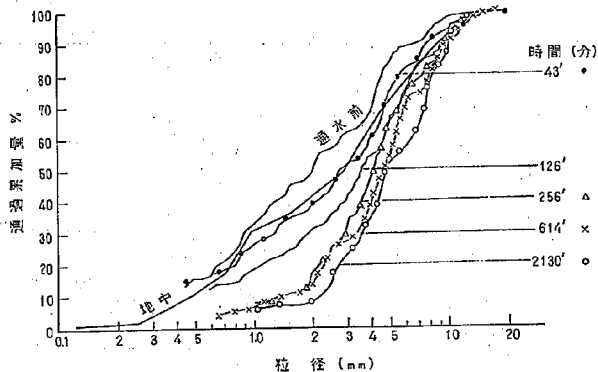


図-17 5m表面粒度曲線 ケース1

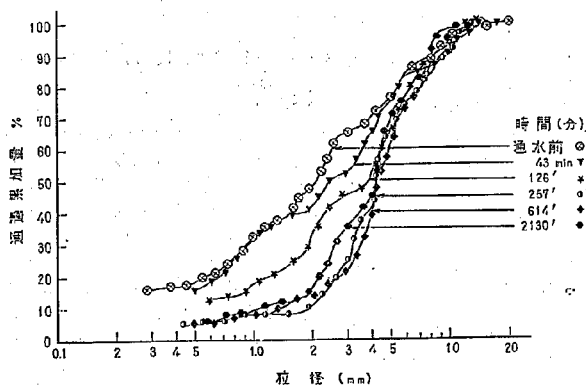


図-18 7m表面粒度曲線 ケース1

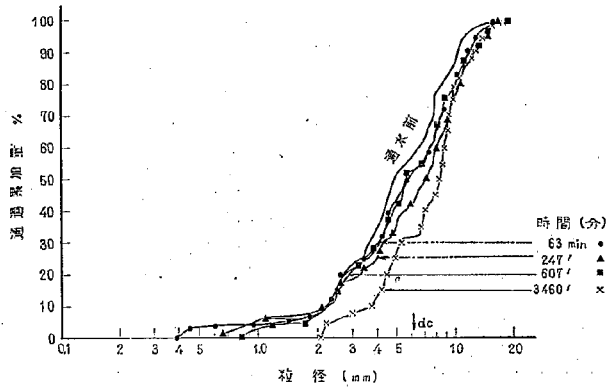


図-19 5 m表面粒度曲線 ケース 2

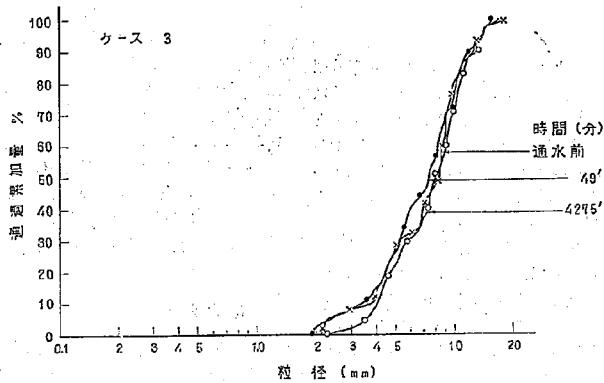


図-20 5 m表面粒度曲線 ケース 3

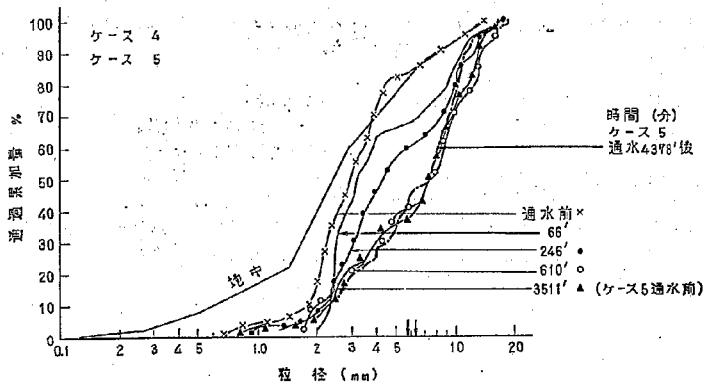
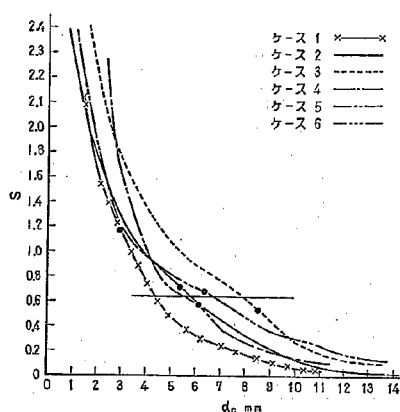


図-21 4 m表面粒度曲線 ケース 4, ケース 5

図-22 S と d_s

計算すると $d_s=2.83\text{mm}$ となる。河床表面の平均粒径は河床低下中に大きくなるから、最初動かなかった粒径はその後動かないにもかかわらず $d_s=2.83\text{mm}$ すると S は 1.21 であり (粒径 2.83mm 以上の石が河床面をおおい、またかさなり合ってしまうことになる。実際の最終の河床面の粒径分布はこのようことはない。)、このことは通水初期において $d_s=2.83\text{mm}$ より大きい石が動いたことを示している (通水初期に多量の土砂が動いたことが観測されている)。ケース 1 の場合の初期表面粒度分布は、小粒径を多く含み、Egiazoroff⁷⁾ が考えたような限界掃流力では粒径別限界掃流力を表わすことができず相等粗度 $k_s=d_s$ の仮定に相当な無理があり、小粒径の中に大粒径の石が突出しているような形となって大礫が動きやすくなったと考えられる¹⁰⁾。

この 5 ケースだけで式 (3) の正当性を主張するにはかなり無理があり、 $S=0.6$ 位というのは、初期表面粒度分布が特定の場合に成立するのであろう。なお 1 ケースにおいて徐々に流量を増して、小粒径を洗い流しながら流量を一定にまで持ていったら、 S は 0.6 に近い値になったものと考えられる。

〔3〕簡易式の問題点および今後の課題

上述した考え方は、実際のダム下流の河床低下とどう異なるかを調べておくことは必要なことであろう。筆者は、すでに天竜川秋葉ダム下流の河床変動と河床材料特性について述べておいた⁹⁾。これによると実河川の河床変動は、我々が考えているより複雑であり次のような問題点を残している。

・初期河床材料は、実河川では横断方向にも、流下方向にも、深さ方向にも、かなり異なっている。これをい

かに代表河床材料とするのか。

・一つの大出水によって河床は急激に変動し、彎曲のためか、砂堆の移動も伴っている所がある。このように局所的に横断方向に掃流力の差の存在する所での河床低下は、表層から小粒径が抜け出ていくという考えに疑問が残る。

・河床変動量を支配する流量をどう決めたら良いのか。秋葉ダム下流では、年最大日平均流量位であると推定できるが⁹⁾、将来より大きい流量によって低下するかも知れない。

・流量の時系列には関係しないのであろうか。ダム築造直後に大きな出水のあった場合と、ダム築造後、長い時間が経過した後大きな出水のあった場合では河床低下量はあるであろう。

・支川の流入土砂量をどう見積もり、それを河床変動の計算にどう組みこんでいくのか。

等々、種々の問題を残している。これらの問題の解決は、多くの実河川のダム下流の河床低下、粒度調査の実測資料を多く集め、その共通項を把握することによって徐々に解決できよう。実験室内の現象のいくらか精密な解析もダム下流河床低下現象の一面面にはかき足りないことを心しておくべきである。

一番問題となるのは河床材料の代表性ということで、調査地点の河床材料が、そのままその横断面の平均的な粒度分布を代表していないことである。それゆえ、なん点かの河床材料調査地点の粒度分布を平均化することが必要になろう。

あとがき

実河川の動きは非常に複雑であり、理論は現象をその一面でとらえただけにすぎない。それは我々の認識しえないもの、数量化しえないものを無視しがちである。理論の適用にあたっては、その限界性を心得ておくべきであろう。

本報告で、ダム下流の河床低下量についての一つの考え方をあたえたが、その限界性、確実性を増す上でも、より多くの実河川での計測が、ここで述べたようなことを意識して調査され、発表され、我々の認識を深めて、ダム下流の河床変動の法則性が把握されることが望まれる。また混合砂の流砂機構のより基礎的な研究もなされねばならない。機会があればもう一度現地資料を集め実用的な河床低下推定法について考えてみたいと思っている。

最後に本実験、解析に当って河川研究室島貞 徹、曾根原術技官の助力と土屋昭彦河川部長の御指導を受けた。深く感謝するしだいである。

記号一覧表

A	流積
$a(nDX)$	単位体積中において $(n-1)DX < X \leq nDX$ にある礫個数
B	川幅
C	Chezy coefficient
$C(nDX)$	単位体積中において $(n-1)DX < X \leq nDX$ にある礫個数
d	粒径
d_t	粒径
d_m	平均粒径
d_s	移動限界粒径
g	重力加速度
$f(X_n)$	混合砂の重量粒度分布密度
$F(d)$	$F(d) = \int_0^d f(X) dX$
p_0	初期河床材料の $f(d)$
q_s	安定なアーマコートとして河床面に残る確率
q_s	単位幅流砂量
Q	流量
R	径深
$S(X)$	粒径 d の礫が河床面を支配する割合
t	時間
u_s	まさつ速度
u_{s+1}	河床面に存在するすべての礫が動かないようなまさつ速度
u_{s+max}	d_{95} の限界まさつ速度
W	$W = X/X_n$
W_s	$W_s = X_s/X_m$
x	距離および $\tau/\bar{\tau}$
X	$X = d$
X_n	$X_n = d_n$
X_s	$X_s = d_s$
Y_n	$Y_n = X_n/\sigma$
Z	河床高
ΔZ	河床低下量
λ	空隙比
τ	掃流力
$\bar{\tau}$	平均掃流力

σ	粒度分布および $\tau/\bar{\tau}$ 変動の標準偏差
τ_{em}	平均粒径に対する限界掃流力
τ_{ef}	粒径 d_t の礫の限界掃流力
β	石の有効表面積支配率

参考文献

- 1) E. W. Lane "An estimate of the magnitude of the degradation which will result in the Middle Rio Grande channel from the construction of the proposed sediment storage basins and contraction works and sample computations showing method of computing degradation or aggradation on the Middle Rio Grande River"
Bureau of Reclamation, Denver, Colo. 1948
- 2) 平野宗夫「armoring をともなう河床低下について」土木学会論文集第195号 1971年1月
- 3) Gessler, J "Self-Stabilizing Tendencies of Alluvial Channels" Proc. of A. S. C. E. vol. 196 Noww 2, 1970
- 4) 河村三郎「Armor Coatの生成に関する研究」第15回水理講演会 1971
- 5) 芦田和男, 道上正規「混合砂礫の河床変動」第15回水理講演会 1971
- 6) Melville S. Prist and Adnan Shindala "Channel Degradation downstream from Large Dams"
Water Power, No. V, 1969
- 7) I. V. Egiazoroff "Calculation of nonuniform Sediment Concentrations" Proc. of A. S. C. E, Hy. 4, 1965
- 8) 山本晃一「急流河川の河床材料調査法と表面粒度特性」土木研究所報告第147号 1974
- 9) 岩垣雄一「限界掃流力に関する基礎的研究」土木学会論文集第41号 1951
- 10) 山本晃一「混合粒径の限界掃流力, 主に二礫混合の場合」土木研究所報告第147号 1975