

河口漂砂の基礎的性質

徳島大学教授 久 宝 保

1. 緒 論

河川流によつて運搬される土砂の一部は河口に堆積し、あるいは水流によつて海へ吐き出される。海へ吐き出された土砂や、河口に堆積した土砂の1部が波浪、風、流水、潮汐、潮流、海底の変動などによつて沿岸を移動し漂砂となる。このようにして河川流によつて河口に運び出された土砂が漂砂の直接的根源となる場合が多く、このようにして生じた漂砂を単に**河口漂砂**とよぶこととする。この研究は河川流によつてもたらされた河口漂砂そのものの基礎的性質を論じたものであつて、その漂砂が河口に堆積したり移動したりする実態や、それによつて生ずる河口閉塞については、改めて発表するつもりである。

(1) **河口漂砂の成因** 河口漂砂を生ずる主な原因については⁽¹⁾、

1. 各種の風化作用による地山からの剥離、
2. 農業、工業などの開発による人工的な製成、
3. 地震、豪雨などによる地滑り、山崩れによるもの、
4. 降雨による sheet erosion や gullying、
5. 洪水流や河川構造物の破損からの河岸や河床の flood erosion、
6. 飛砂、
7. 下水、鉱山または工業用水などの排水によるものが考えられる。このうち、わが国では 2.、4. 及び 5. によるものが特に著しい原因と思われる。

(2) **河川の流出土砂** 河口漂砂となる河川の流出土砂量の大きさは、つぎの条件によつて相違する。すなわち 1. 季節、2. 気候 (降水、風、凍結の程度と期間)、3. 流域 (地勢、地質、表面の状況、流出率)⁽²⁾、4. 河相 (河川流、河岸河床の状況) が問題となる。

こうして河川流によつて運搬される土砂の全部が河

口に達するのではなく、現在ではダムによつて堆砂として留められるものも少なくない。たとえば貯水池の1年間の平均堆砂量の大きいものは、庄川小原ダムの 939,898 m³、本曾川大井ダムの 906,541 m³、庄川祖山ダムの 847,084 m³、天龍川泰阜ダムの 663,119 m³、常願寺川の本宮砂防ダムの 372,435 m³ といわれ、10,000 m³ 以上のものも極めて多い⁽²⁾。もしも前述の条件 (1.~4.) と相似した河川で河口に達するものでは、それらの実例よりみて年間 10,000 m³ 以上の河口漂砂を生ずることが多いのではなからうかと思われる。

(3) **河口漂砂の研究手法** 河口漂砂を研究する方法として、1. 実測による方法、2. 実験の方法 (基礎実験、模型実験)、3. 理論的方法 (次元解析、抵抗法則、エネルギー方程式、運動方程式による方法)、があげられる。それらは個々には一長一短があるので、全体的に研究されねばならないが、基礎的な理論的研究と河口漂砂の実態との懸隔はかなり大きいと思われる。

2. 粒子に関する考察

河口漂砂の粒子の大きさ、形、比重、混合状況はその水理学的研究の基礎である。

(1) **粒子の大きさ** 徳島県那賀郡今津村附近の漂砂は概して那賀川 (3号位) 及び勝浦川 (4号位) の河口

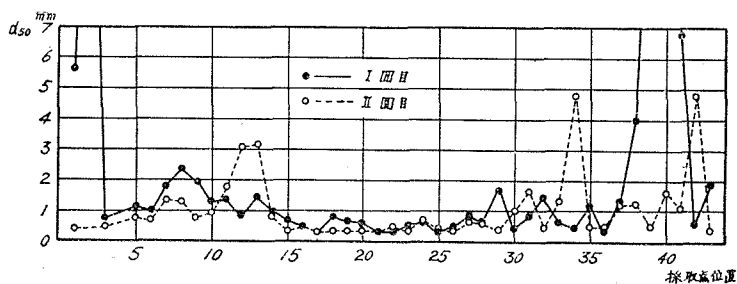


図-1 海岸砂の粒徑の例

漂砂よりなるものと思われる。その海岸における堆砂の篩い分け結果を示すと、図-1 のようになり、平均粒徑 (d_{50}) が 0~1 mm、大体 0.4~0.5 mm のものが最も多いようである。すなわち、この結果より小さい

シルトや粘土は沖へ運ばれて、いわゆる「ヘドロ」となつて海底に堆積しているものと思われる。従つてこのような粗砂では静水中の沈降速度に関する Stokes の法則による粒径 (1/16 mm) の範囲より大きいといえる。

(2) 粒子の比重 河川の土砂粒子の比重は、その鉱物によつてかなり変化するが、大体 2.65 位であつて、河川の砂利に関して測定した結果、吉野川で 2.68、多摩川で 2.75、那賀川で 2.65、物部川で 2.60、仁淀川で 2.63 を示した。

(3) 粒子の形 河川の砂利に関して、最小、中央及び最大径の中央値の比を求めると、吉野川で 1:1.54:2.24、多摩川で 1:1.53:2.12、那賀川で 1:1.54:2.30、物部川で 1:1.46:1.77、仁淀川で 1:1.36:1.92 であり、大体擬似楕円体である。ただし河口漂砂ではそのような比が求められなけれども大体扁平と思われ、それらが扁平な面を水平にして堆積しやすい。従つて河口堆積土砂が層積をしていることがある。たとえば 図-2 は徳島県海部川の河口閉塞土砂の層積の状態を示したもので、図はその河側である。

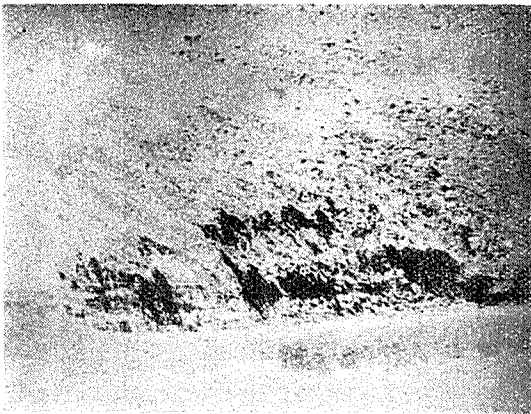


図-2 海部川の河口州の層積

(4) 静水中の沈降速度 静水中における土砂の終局沈降速度 w は、

$$w = \phi_1(\alpha, d, D, \mu, \rho_s, \rho_w, N) \quad (1)$$

で示され、 α : 土砂の形による値、 d : 同じくその大きさ、 D : 実験用器の大きさ、 μ : 水の分子粘性係数、 ρ_s 、 ρ_w : 土砂及び水の密度、 N : 同時沈降する土砂の数、それらの函数 ϕ_1 で w が与えられる。もしも D が d に比して大きく、 $D/d > 100$ では (1) 式より D を省くこ

とができるものと思われる⁽¹⁾。また N については、1,000 個以上を沈降せしめて、その中央位置の速度を測定すると (1) 式より N を省くことができる。いま水温 24°C、内径 91mm、長さ約 2,000 mm のガラス円筒内における $d=2.6\sim 3.3$ mm と $d=3.4\sim 4.0$ mm の砂の沈降速度を測定し、その平均値と個数 N との関係を推定すると 図-3 のようになった。従つて D 及び N を大きくすると (1) 式は、

$$w = \phi_2(\alpha, d, \mu, \rho_s, \rho_w) \quad (2)$$

となり、土砂粒子の形、粒径、密度の特性を代替する値として、簡便に静水中の沈降速度を測定して用いることができるわけである。

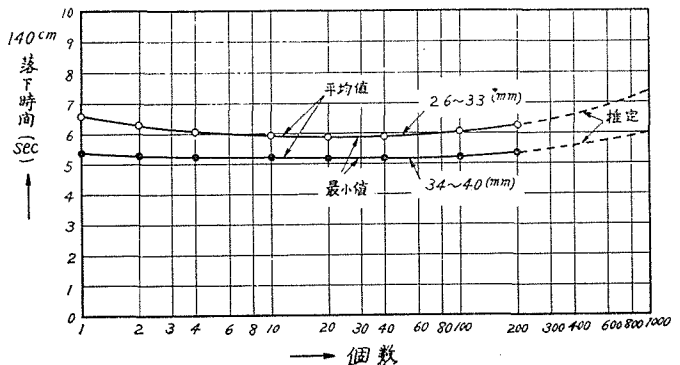


図-3 沈降速度と個数

3. 河口漂砂粒子の運動

河口漂砂の運動を大別して粒子個々の運動と集団的運動とし、ここではその前者を基礎的に考えてみたい。

(1) 概説 水流を分類して、乱流と整流、射流と常流の4型とする場合と、時間的な定流と不定流、距離的な等流と不等流(加速流と減速流)とする場合とがある。このようにして水流の内部摩擦の状況や慣性の状況に相違があり、その相違によつて土砂粒子を移動させる状況に変化があるはずである。

つぎに河床粒子の移動状況に関しては、1. 転動、

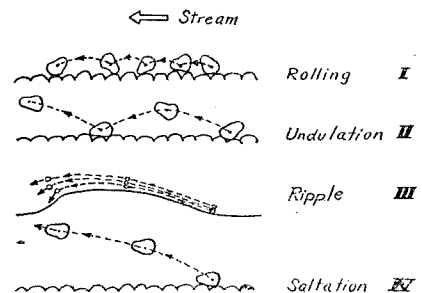


図-4 水流中の粒子の運動

2. 躍動, 3. 砂漣状移動, 4. 浮遊, 5. 滑動, 6. 伴動とすることができる。このうち基礎的には1.~4.が主なるものと思われ、図-4はそれらを示したものである。

これら運動のいずれがなされるかについては、河床の状況、土砂の内部摩擦、測定区間の上流より土砂の補給があるかないか、等によると同時に、前記の水流の状況にも関連する。また水流中の土砂の移動状況によつて水流の状況にも相違があり、たとえば砂漣状移動粒子の水流の水面が動揺をすることもあり、浮遊土砂量が大になつて乱流が整流的な性質を帯びることもある。

(2) 粒子の移動に関する水理学的要素 水流中を移動する土砂粒子に関する水理学的要素は、

$$\alpha, d, \mu, \rho_s, \rho_w, f, g, \theta, u_s$$

で、 f は粒子の移動に伴つて失われる各種の摩擦であり、たとえば粒子が転動する場合には移動しない粒子との間の回転摩擦係数がこれに含まれる。この f の値は一定ではなく、前述の運動(1.~6.)状況によつて相違する。また、 g :重力加速度、 θ :底面勾配、 u_s :粒子速度、である。このうち、 $\alpha, d, \mu, \rho_s, \rho_w$ は前述の(2)式によつて静水中の粒子の沈降速度で代替することができるものと思われ、前の要素を、

$$w, f, g, \theta, u_s$$

とすることができる。

つきに水流に関する水理学的要素としては、単なる2次元等流では、

$$y, S, f', \mu, g, \rho_w, d, u_w, \alpha$$

とすることができる。ここに S は水面あるいは底勾配であり、 u_w は水流の平均流速である。また f' は水流の状況によつて生ずる摩擦を示し、乱流の交換係数を示すこともある。いま、

$$u^* = \sqrt{gyS} \quad (2)$$

として、characteristic velocity とすると、前記の水理学的要素は、

$$u^*, u_w, f', \mu, \rho_w, d, \alpha$$

とすることができる。また、

$$C = u_w / u^*$$

とすると、

$$C, u^*$$

となり、ここに、

C は f', μ, ρ_w, d 及び α の函数となる。ところが θ と S とが同じ底勾配を示すので、水流中の粒子の運動と水流との相関的な状況における水理学的要素は、

$$C', u^*, w, u_s$$

となり、 C' は $f', \mu, \rho_w, d, \alpha$ 及び f の函数である。従つて、 C', u^*, w, u_s の相関々係を求めることが、河口漂砂の運動を究明することになる。

(3) 粒子の運動に関する実験的考察 巾6 cm, 高さ約30 cm, 長さ約3 mのガラス張り水路(図-5)の中に篩い分けた砂や砂利を敷き、2馬力モーター直結渦巻ポンプ(3吋)による循環水を通じ、水槽及び越

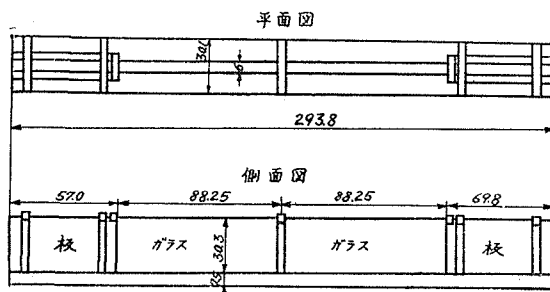


図-5 実験用水路

流堰によつて流量の変動をなくし、これによつて35 mm写真及び16 mmシネで撮映し、流量は堰によつて測定し、水深、水面及び底勾配は写真をスライドにかけて求めることとした。また流量は0より漸次大きくする方法を用いた。

内部摩擦のない砂上の水流に関するG. StricklerよりE. W. Laneに至る平均流速公式より⁽³⁾,

$$u_w = K \left(\frac{y}{d} \right)^{1/6} \sqrt{gyS} \quad (3)$$

を用いると、 $K(y/d)^{1/6}$ をもつて前述の摩擦係数 C' に

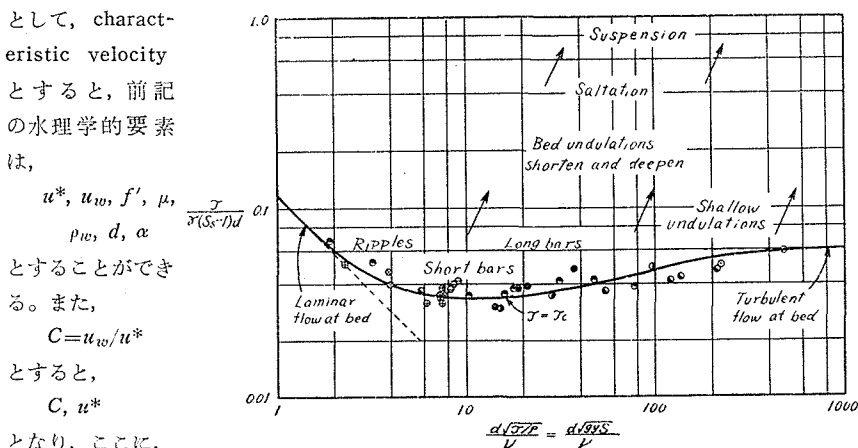


図-6 Shields による粒子運動の解析図

かえることができる。ここに、 $y/d=0\sim100$ の間で、

$$\frac{288}{\sqrt{g}} \left(\frac{y}{d} \right)^{1/6} \approx 5.75 \log_{10} \frac{y}{d} + 2.10$$

が成り立ち、Prandtl-Kármán の抵抗法則と近似する。ここに K はなお $f', f, \mu, \rho_w, \alpha$ の関数であつて、水質に関する μ, ρ_w が一定であつても、前記の粒子の運動状態 f によつて変化するはずである。

A. Shields は水流の掃流力 τ を用いて、

$$\tau/\gamma(S_s-1)d \text{ と } d\sqrt{\tau/\rho}/\nu$$

との相関々係の図を示している。ここに、 $\gamma=\rho_w g$, $S_s=\rho_s/\rho_w$, $\nu=\mu/\rho_w$, であり、また、 $\tau=\gamma g S$ である、(図-6)。

いま Shields の方法を参考として⁽¹⁾, (3) 式による

$$K=u_w/(y/d)^{1/6}\sqrt{g y S}$$

と水流の Reynolds 数 $R_e=u_w y/\nu$ との関係をわれわれの実験結果より示してみると、図-7 のようになった。

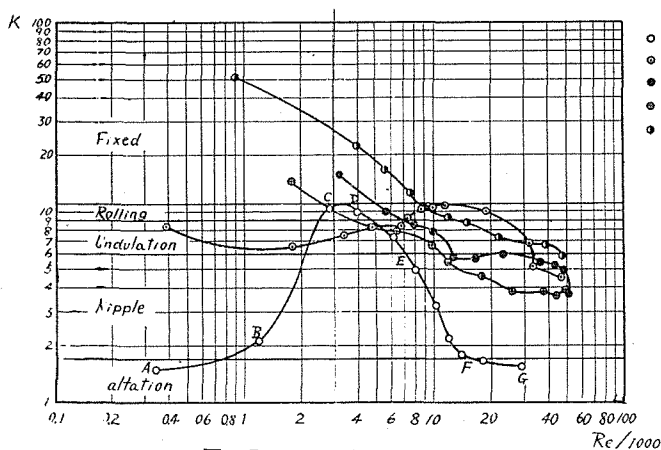


図-7 K と R_e との関係

いまその図に従つて、水流中の砂粒子の運動について説明を加えよう。まず、

1. 最初水路内に砂を入れた場合の起伏や搦固めなどによつて、 K の値 (R_e に応ずる) の出発点が実験ごとに相違する。それが図の曲線の最初の点を示している。

2. 水流によつて表面の粒子の配列が変わり、扁平な面を上にしなおす。これは小さい粒子では著しく、たとえば図の A-B-C の曲線がそれである。

3. 大きい粒子では Reynolds 数の小さい間は全く不動である。すなわち、図の固定の領域に位置する測点がそれである。

4. 流量を大きくすると、粒子がビクビクと動く。

5. さらに流量を大きくすると、粒子が転動しはじ

める。これが図の C-D である。

6. 流量をさらに大にすると、粒子が盛んに転動し、あるいは躍動をはじめ。これが D-E である。

7. この躍動の領域での粒子は砂漣を形成しつつある状態であると思われる。

8. さらに流量を大きくすると、 K の値が漸次減



図-8 砂 漣

少して、水流の流速が低下する。

9. 流量の一層の増大により、砂漣が益々発達する場合と、砂漣が崩れたり、またできたりする場合がある。これが E-F の区間である。たとえば図-8 は砂漣ができた場合を示している。

10. この領域で測定区間の上流より砂を補給すると、かなり大きい砂利の場合にも砂漣が生ずる。

11. さらに流量を増大せしめると、躍動粒子が沈降せず、浮遊の状況におかれる。これが F-G の区間で、 K の値が最小となる。

このような実験を11種の大きさの砂及び砂利について行つた結果、大体において図に示した五つの領域を考えてみることにした。これらの曲線は固定的なものでなく、同じ粒径の砂に関しても勾配 S によつて全く別の曲線をうることが予想せられる。たとえば S が小さくて、 K の大きい水流で粒子がその流量の増大によつて移動することがなければ、その曲線は図の固定の領域から下ることはいないであろう。また、躍動領域より小さい K を示さないで、ついに砂漣のできない砂利河床も存在するものと思われる。

また砂漣は局所的な粒子の転動、躍動、浮遊及び沈降、あるいは水中安息角以上に達する崩壊の合成した

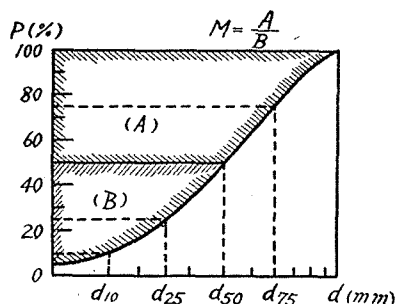
ものと見ることもできる。しかも本実験の観測結果よりすると、Reynolds 数の漸増とともに、転動、躍動、砂漣状移動、浮遊の順番に粒子が移動し、一部粒子が浮遊の状態にある場合には、他の粒子の躍動及び転動が盛んであり、その移動状況は転動、躍動、浮遊の順に減ずるようである。

4. 集団としての粒子に関する考察

前述の砂漣状の粒子の水流中の移動は、個々の粒子の移動速度に比してかなり小さい速度である。このようにして、河口漂砂を集団として取り扱う場合には、またかなり相違した研究方法が考えられる。

(1) 混合状況 河口漂砂は細粗種々の大きさのものが混じている場合が多い。その混合状況によつて、空隙率を異にし、単位体積重量が相違する。もしもその混合状況が近似であれば平均粒径 d_{50} のみによつても、充分にその混合土砂の大きさを代表する値とみなすことができよう。ただ砂利についていえば、ある河川のある区域内ではその混合状況がかなり近似しているということが、吉野川や物部川の実測から推定できた。しかし、土砂の場合には明らかな相違が認められたので、河口漂砂では恐らく種々の混合状況を示すに違いないと考えられる。

混合状況を示すには、粒度曲線（累積）が用いられ、図—9 はその例である。土質工学では d_{10} を有



図—9 粒度累積(加)曲線

効径、 d_{60}/d_{10} を均等係数と称して用いられていたこともあつたが、現在では土性と粒度曲線との関連についての研究が基となつてゐる。水理学的方面では Kramer などによる混合係数 $M (=A/B)$ や境 隆雄氏による $2+M/(1+M)$ が用いられている⁽⁴⁾。

統計学的には粒度分布曲線による d_{50} 、標準偏差及び歪度が混合状況を示すのには都合がよい。特にその曲線が正規誤差曲線を示している場合には、標準偏差 σ が、 $\sigma = d_{84.1} - d_{50} = d_{50} - d_{15.9}$ として簡単に求められる⁽¹⁾。

(2) 水理学的性質 集団としての河口漂砂の比重や形などは、その個々の粒子の比重や形などの中央値に近より、大体大差がないものと考えられる。たとえば砂利の比重は $\rho_s/\rho_w = 2.65$ 、砂利の偏平比は 0.65 として差支えないことが多い。従つて集団としての静水中の沈降速度も、平均して大体粒子の大きさのみによつて差支えなくなる。

A. H. Gibson による土砂の水中安息角 ϕ は次式によつて与えられている⁽⁵⁾。すなわち、

$$\tan \phi = (0.92, 0.71) d_{50}^{0.125} (\rho_s/\rho_w - 1)^{0.19} (l/h)^{0.25}$$

ここに 0.92 は静水中、0.71 は乱れた水の中、 d_{50} は時、 l/h は粒子の最大直径に対する最小直径の比で、1.57~1.19 の例を揚げてゐる。しかしこのような値も厳密に言えば、土砂の混合状態でかなり変化するものと思われる。

また W. Hazen によると、 d_{60}/d_{10} と空隙率との相関々係を 200 余種の土に関して測定した結果もある。砂利に関する空隙率と d_{25}/d_{75} との間にも相関があるように思われる。

5. 底 床 流 砂 量

河床に沿つて転動、躍動、砂漣状移動、伴動（周辺の粒子の移動に伴う粒子移動）、あるいは滑動する粒子は底床流砂として取り扱われ、河口漂砂となることがある。H. A. Einstein (1940) が米国の Enoree 河で測定したところ、0.351 mm 以上の粒径の土砂がこれに属するという⁽⁶⁾。わが国のような急流河川では砂利底質よりなるものが多く、特に底床流砂量が浮遊流砂量より多い場合を推定すると、河口漂砂もこのような底床流砂によつて生じやすいものと思われる。この底床流砂量の推定方法は、前述の粒子個々の運動と水流の状況との相関の研究と、移動粒子の集団としての混合状況との関連を研究することによつて、はじめて可能であるが、現在ではまだ充分なる結果をえていない。

Carl B. Brown の紹介によると⁽¹⁾⁽⁷⁾、du Boys の式

$$q_s = C_s \tau (\tau - \tau_c)$$

を基とする方法が述べてある。ここに C_s は Straub の Missouri 河の実測に基づいて決定し、 τ は水流の掃流力、 τ_c は限界掃流力である。この式を Manning の平均流速公式による水の流量 q と比較すると、

$$\frac{q_s}{q} = \frac{0.000924 \gamma_w^2 n y^{1/3} S^{3/2}}{d_{50}^{3/4}} \left(1 - \frac{S_c}{S} \right) \quad (4)$$

ここに、 γ_w は水の単位重量、 n は Manning 公式の粗度係数、 S は勾配であつて、

$$S_c = 0.00082 \{ (d_{50} + 0.8) / y \} \quad (5)$$

としている。ただし、単位は kg, m, sec を用い、 d_{50} のみは mm としている。

この式は dimensional に正しくない。前掲の Shields は、

$$\frac{\gamma_s q_s}{\gamma_w q_f} = 10 \frac{\tau - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) d_{50}} \quad (6)$$

を提唱し、 d_{50} が 1.56 ~ 2.47 mm でよく合うことを示している。

H. A. Einstein は d_{50} が 0.315 ~ 28.6 mm の範囲で、

$$\frac{\gamma_s q_s}{\gamma_w \sqrt{g(\gamma_s/\gamma_w - 1)w(d_{50})^{2/3}}} = 40 \left(\frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma_w) d_{50}} \right)^3 \quad (7)$$

が成立することを示している。ここに w は土砂の水中の沈降速度である。

A. A. Kalinske は多くの研究を発表し、土砂の統計学的な値 p を用いて、

$$\frac{q_s}{\sqrt{\tau/\rho_w} p d_{50}} = 7.3 \phi \left(\frac{\tau_c}{\tau} \right) \quad (8)$$

を示し、 p 及び ϕ は実測結果より求めるのがよいとしている。

椿東一郎氏は乱流理論より、前記多くの学者の実験結果を総合して、

$$\log \frac{q_s}{(\tau - 0.8 \tau_c) u_*^* \left\{ \frac{(\gamma_s - \gamma_w) d_{50}}{\tau} \right\}^{4/5}} = A - B \log \frac{k_s}{d_{50}} \quad (9)$$

とし、 $d_{50} = 0.305 \sim 1.71$ mm で $A = 1.63 \sim 1.61$, $B = 0.435 \sim 0.62$ とするとともに、

$$\log \frac{k_s}{d_{50}} = 3.48 \left\{ 1 - 0.225 \sqrt{(\gamma_s - \gamma_w) d_{50} / \tau} \right\} \quad (10)$$

を提唱している⁽³⁾。

J. Bogardi は水流の底部の限界掃流流速を用いて、底床流砂の運動を論じている⁽⁹⁾。もしもそのような底部の水流流速 u_{bc} が既知であると、静水中における粒子の移動速度 w_0 を推定することによって、

$$q_s = k(u_b - w_0)d \quad (11)$$

として、底床流砂量を推定することができよう。さらに底部の限界掃流流速では $q_s = 0$ であるから、(11)式は、

$$q_s = k(u_b - u_{bc})d \quad (12)$$

とおかれ、 u_{bc} はその限界掃流流速を示す。

7. 浮遊流砂量

浮遊流砂量の推定方法も極めて多い。しかも浮遊流砂は同じイオンを有し静水中では互に反撥して懸垂の状態を保持しやすいが、高度に塩分を含む海水では、NaCl の Na イオンが粒子の Ca や Mg イオンと入れ替わつて、そのチャージがなされ、互に吸引し、フロックや塊りとなつて沈降しやすく、さらにフロックの凝集によつて他の土砂粒子を吸引して益々沈降しや

すくする。このようにして河口漂砂となる場合も考えられる。

この浮遊流砂量の推定方法として、前掲の Brown によつて紹介せられているものを示してみよう⁽¹⁾。それには、O'Brien による式、

$$Cw = -\varepsilon \frac{dC}{dz}$$

が基となつているが、この式で C は流砂濃度、 ε は交換係数、 z は底より鉛直上向きの座標を示す。いま濃度分布を、

$$\frac{C}{C_a} = \exp \left(-15 \frac{z-a}{y} \frac{w}{\sqrt{\tau/\rho}} \right)$$

とし、底部 $z=a$ における濃度を測定して C_a とし、水深を y とする、($\rho = \rho_w$)。これより Lane や Kalinske の輸送関数を用いて、

$$q_s = \int_0^y u_w C dz = q C_a P \exp \left(15 \frac{a}{y} \frac{w}{\sqrt{\tau/\rho}} \right) \quad (13)$$

を求めている。ここに q は水の流量、 P は Manning の平均流速公式による粗度係数 n と $w/\sqrt{\tau/\rho}$ とによつて、図-10 のように与えられている。

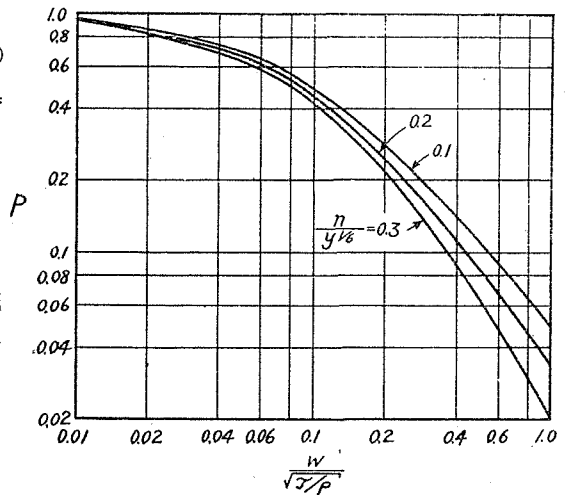


図-10 P と $w/\sqrt{\tau/\rho}$ との関係

河口漂砂が細粗の粒子の集団である場合には、底床流砂量と浮遊流砂量との合計の量が移動するわけである。従つて概念的に浮遊流砂濃度が底床における流砂濃度 C_a と連続すると考えれば、(13)式はさらに都合よく用いられることになる。

文 献

- (1) H. Rouse; Engineering Hydraulics, 1949, pp. 769~807.
- (2) 資源調査会土地部会資料；“河川堰堤の堆砂量に就て”，建設省河川局利水課，No. 114, p. 37.

- (3) E. W. Lane; "Progress report on studies on the design of stable channels by the Bureau of Reclamation," P.A.S. C.E., Vol. 79, No. 280.
- (4) 境 隆雄; "河床砂礫に対する限界掃流力に就て", 土木学会誌, 第31卷, 第2号.
- (5) J. Allen; Scale Models in Hydraulic Engineering, 1947, p. 212.
- (6) H. A. Einstein, A. G. Anderson, Joes W. Johnson; "A distinction between bed-load and suspended load in natural streams," Trans. Am. Geophys. Union, 1940, p. 628.
- (7) 久宝 保; "河床流砂量研究の最近の傾向", 土木学会誌, 第37卷, 第8号, (資料), p. 38.
- (8) 朴東一郎; "水路床砂礫の掃流量に就いて", 九大流体工学研究所報告, 第7卷, 第4号, p. 25.
- (9) J. Bogardi; "Solid transportation by rivers with special reference to measurements made in Hungary," Le Houille Blanche, 1951, Mars-Avril, p. 108.