

九州大学 正員 平野 栄夫

九州大学 学生員 〇渡辺 訓甫

九州大学 学生員 岡田 豊昭

## 1. 緒言

浮流砂については古くから研究が行なわれ、浮遊現象を流水の乱れによる拡散現象と考へて、濃度分布の基礎式が導かれている。また、浮流砂量の算定に関しては、Lane-Kalinske や Einstein の方法が多く用いられているようであるが、其の適合性に関する検討は従来殆んど行なわれておらず、どの程度まで信頼できるか疑問であるとされている。其の後多くの研究がなされているが、基本的には、Rouse や Kalinske の理論の域を脱せず、其の浮遊機構も解明されていないのが現状である。すなわち、浮遊土砂を含む流れの特性、乱れの構造の変化、砂粒の浮遊限界、基準濃度の評価、wash load の評価などに関して未解の状態であり、これらの系統的な解明がなされなければ、有効な浮遊砂量の算定は困難であろう。着者は、今後もこれらの諸問題の検討を進めていく計画であるが、本文は Lane-Kalinske および Einstein 式の適合性を実験結果から考察して、浮流砂量の算定方法に関して一つの提案を行なったものである。

## 2. 実験結果および考察

実験には、高さ 40 cm、幅 60 cm、有効長 11 m の鋼製可変勾配循環水路を用いた。試料は均一砂としてポリスチロールを用い、湿潤させ、これを水路に敷いて通水し、定常状態において、濃度分布、全流砂量、流速分布を測定した。濃度分布はサクションにより採取し、全流砂量は上流端と下流端の充分に振盪されているところで採取した。実験および試料の要目は下表のようである。

表-1

|      | 単位幅流量<br>$q$ ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ) | エネルギー勾配<br>$I_e$       | 水深<br>$h$ (cm) | 平均流速<br>$V$ ( $\text{m}/\text{sec}$ ) | 全流砂量<br>$q_T$ ( $\text{m}^3/\text{sec}$ ) | 水中比重<br>$S$ | 平均粒径<br>$d$ (mm) | 沈降速度<br>$w_0$ ( $\text{m}/\text{sec}$ ) |
|------|-------------------------------------------|------------------------|----------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|-------------|------------------|-----------------------------------------|
| No.1 | 350                                       | $0.353 \times 10^{-3}$ | 12.92          | 27.1                                  | 2.29                                      |             |                  |                                         |
| No.2 | 342                                       | 0.783                  | 9.85           | 34.7                                  | 15.14                                     | 0.052       | 0.0805           | 1.16                                    |
| No.3 | 356                                       | 0.867                  | 8.98           | 39.5                                  | 15.48                                     |             |                  |                                         |

浮遊粒子の沈降速度  $w_0$  に関しては、其の実測値と Rubey 式による計算値とを比較したところ、よく合うので、通水中における粒子沈降速度としては、Rubey 式による計算値を用いた。

$$\text{Rubey 式} \quad \frac{w_0}{\sqrt{sgd}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgd^3}} \quad \nu: \text{動粘性係数}$$

実験結果を Einstein の方法、および Kalinske の方法で整理したものが表-2 である。また、濃度分布の一例として実験 No.3 の場合の分布を図-1 に示す。表-2 の基準濃度  $C_a$ 、浮流砂量  $q_B$  は、同図のように各々式で計算されたものである。

$$\text{Einstein} \quad q_s = q_B (PI_1 + I_2), \quad P = 2.303 \log_{10} \frac{30.2 h \pi}{d_{65}} \quad \textcircled{1}$$

$$Ca = \frac{z_B}{11.6 u_*' a}, \quad a = 2d, \quad u_*' = \sqrt{g R' I e} \quad (2)$$

Lane-kalinske

$$z_B = z C_0 P, \quad P = f\left(\frac{w_0}{u_*'}, \varphi\right), \quad (3)$$

$$C_0 / \Delta F(w_0) = 5.55 P_*^{1.61}, \quad \Delta F(w_0) = 100\% \quad (4)$$

Kalinske の方法で計算すると、  
 其の値は実測値より数オーダー小  
 くなり、 $Ca$ として④式で与えら  
 れる河床濃度 $C_0$ が小さ過ぎる。こ  
 れは、米国実測河川のデータに基  
 づく半理論的な式であるために、  
 其れをすぐ適用できないところに  
 原因があると考えられる。Einstein  
 式による計算値も遮蔽係数を  
 考慮していないにもかかわらず、  
 実測値よりも小さくなっている。  
 Hunt の導いた濃度分布式を用い  
 ると、式の上では $Ca$ の代わりに、  
 $Ca/(1-Ca)$ としたことになるので

Einstein 式で新たにこの値を用いて計算したものを表-2に加えてい  
 るが、いずれにしても、根本  
 的には②式で与えられる $Ca$ の値が実測値と可成り良い適合を示すことを考慮すれば、Rouseの濃度分  
 布式が底面附近で合わないと考えられる。一方、一般に、流速分布は底面近傍では対数分布則から上

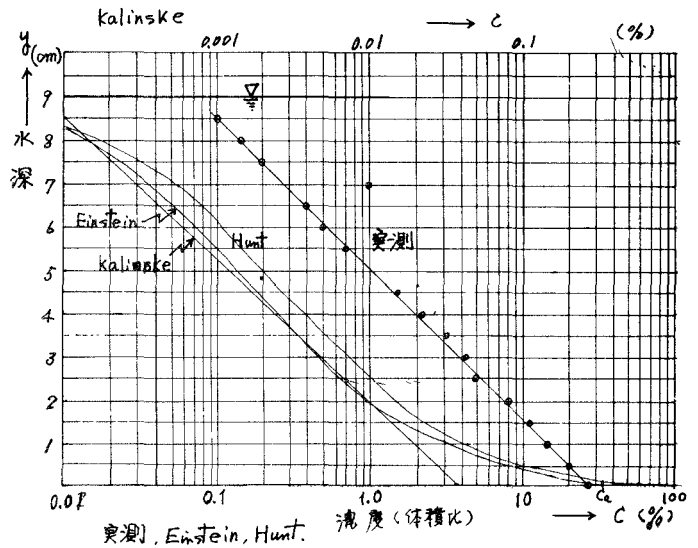


図-1 濃度分布

表-2

|       | $U_*'$ | $u_*'^2/sgd$ |               | $Z$<br>(実測) | $Ca$                   | $z_B/U_*'d$           |       | $z_B/U_*'d$ |
|-------|--------|--------------|---------------|-------------|------------------------|-----------------------|-------|-------------|
|       |        |              |               |             |                        | 計算値                   | 実測値   |             |
| No. 1 | 1.49   | 0.541        | Einstein      | 1.49        | 0.22                   | 10.31                 | 13.98 | 5.1         |
|       |        |              | Hunt          |             | 0.28                   | 13.15                 |       | 6.5         |
|       |        |              | Lane-kalinske | 0.86        | $0.119 \times 10^{-3}$ | $2.13 \times 10^{-2}$ |       | —           |
| No. 2 | 1.99   | 0.965        | E.            | 1.84        | 0.315                  | 8.42                  | 87.21 | 7.3         |
|       |        |              | H.            |             | 0.46                   | 12.30                 |       | 10.65       |
|       |        |              | L-K.          | 1.175       | $0.276 \times 10^{-3}$ | $4.47 \times 10^{-2}$ |       | —           |
| No. 3 | 2.44   | 1.223        | E.            | 1.30        | 0.345                  | 10.38                 | 77.85 | 8.0         |
|       |        |              | H.            |             | 0.527                  | 29.60                 |       | 12.2        |
|       |        |              | L-K.          | 1.007       | $0.362 \times 10^{-3}$ | $6.45 \times 10^{-2}$ |       | —           |

方へはずれる。これは底部において拡散係数が或る一定値を持つたためと思われる。今、混合距離を一定 ( $l=l_0$ ) とする。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_0}{u_*} + \frac{2}{3} \frac{h}{l_0} \{1 - (1-s)^{3/2}\}$$

一方、渦動粘性係数を一定にする。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_0}{u_*} + \frac{u_* h}{\varepsilon} \left\{ 5 - (5^2/2) \right\}$$

である。ここに、 $s = y/h$ ,  $y=0$  で  $u=u_0$ 。

実験の流速分布から  $u/u_* \sim \{5 - (5^2/2)\}$ ,  $u/u_* \sim \{1 - (1-s)^{3/2}\}$  の関係を調べてみると、その一例を図-2に示すように、 $s = 0.2 \sim 0.3$  の値以下については、 $\varepsilon$  はほぼ一定といえるようであり、この事については足立らもすでに指摘している。

以上の考察から、底部附近の拡散係数を一定とみなせる領域と、其れが水深と共に変化する領域の2層に分け、各々の領域について、次のような濃度分布式と流速分布式を提案する。

Hunt は粒子に対する拡散方程式と残りの水の部分に対する拡散方程式とを連立させて、沈降速度の減少効果を考慮した濃度分布式を導いている。すなわち、粒子が鉛直方向にのみ分布しているとする。

$$\varepsilon_s \frac{dc}{dy} + (1-c) c w_0 = 0 \quad , \quad \varepsilon_s: \text{粒子の拡散係数} \quad (5)$$

水路底面近傍 ( $0 \leq y \leq H$ ) では、 $\varepsilon_s$  が運動量の拡散係数  $\varepsilon_m$  に等しくて、一定であるとする。

$$c = \left[ 1 + \frac{1-C_a}{C_a} \cdot \exp \left\{ \frac{w_0}{l_0 u_*} (y-a) \right\} \right]^{-1} \quad \begin{matrix} \varepsilon_s = \varepsilon_m = l_0 u_* , & 0 \leq y \leq H \\ y=a \text{ で } C=C_a \end{matrix} \quad (6)$$

Rouse 分布は水表面で  $c=0$  となるが、其れは栗原が指摘しているように、流れの上半部の乱れは自由な乱れに近く、そこで Prandtl-Kármán の相似仮説が成り立たないためである。しかしながら、この矛盾が生じる範囲は水表面の極く近傍に限られ、実用上は水路底面近傍を除く全域で、従来の Rouse 分布が成り立つと考えてよい。従って、 $H \leq y \leq h$  では  $\varepsilon_s = \varepsilon_m = K u_* y (1-y/h)$  と (Hunt の考えに従えば)

$$C = \left[ 1 + \frac{1-C_H}{C_H} \cdot \left\{ \frac{h-H}{H} \frac{y}{h-y} \right\}^{w_0/Ku_*} \right]^{-1} \quad \begin{matrix} K: \text{Kármán 定数} \\ y=H \text{ で } C=C_H \end{matrix} \quad H \leq y \leq h \quad (7)$$

⑥式と⑦式とを  $y=H$  で接続させると、 $H \leq y \leq h$  における濃度分布式は

$$C = \left[ 1 + \frac{1-C_a}{C_a} \exp \left\{ \frac{w_0}{l_0 u_*} (H-a) \right\} \cdot \left\{ \frac{h-H}{H} \frac{y}{h-y} \right\}^{w_0/Ku_*} \right]^{-1} \quad H \leq y \leq h \quad (8)$$

となる。理論的には  $C_a, l_0, H$  等を与えれば、各領域での濃度を計算できる。

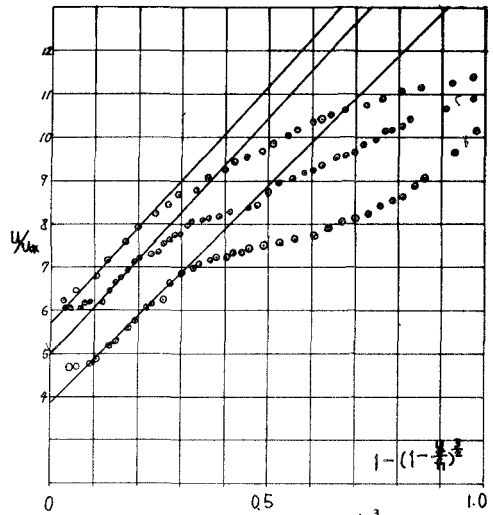


図-2  $u/u_* \sim \{1 - (1-y/h)^{3/2}\}$

次に、Plandtl の混合距離の概念より、混合距離を  $l$  とすれば、摩擦応力は

$$\frac{\tau}{\rho} = l^2 \left( \frac{du}{dy} \right)^2$$

また、水路床における摩擦応力を  $\tau_0$  とすると

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{\tau_0}{\rho} \left( 1 - \frac{y}{h} \right) = u_*^2 \left( 1 - \frac{y}{h} \right)$$

従って、

$$\frac{du}{dy} = \frac{u_*}{l} \left( 1 - \frac{y}{h} \right)^{1/2}$$

水路床近傍 ( $0 \leq y \leq H$ ) で  $l = l_0 = \text{const.}$ ,  $y=0$  で  $u = u_0$  として上式を積分すれば

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_0}{u_*} + \frac{2}{3} \frac{h}{l_0} \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{y}{h} \right)^{3/2} \right\} \quad 0 \leq y \leq H \quad (9)$$

それより上層部の流速分布としては前述のように、水表面まで従来の対数分布則が成立するとして

$$\frac{u}{u_*} = 8.5 + \frac{2.3}{K} \log_{10} \frac{y}{Ks} \quad H \leq y \leq h \quad (10)$$

⑨式と⑩式とを  $y = H$  で接続させると、底面附近での流速分布は次式で表わされる。

$$\frac{u}{u_*} = \left( 8.5 + \frac{2.3}{K} \log_{10} \frac{H}{Ks} \right) + \frac{2}{3} \frac{h}{l_0} \left[ \frac{1 - (H/h)}{1 - (y/h)} \right]^{3/2} \quad 0 \leq y \leq H \quad (11)$$

浮流砂量は、一般に、 $Q_s = \int_a^h C u dy$  で計算されるから、この場合には、拡散係数が一定とみなされる底面附近の領域では⑨式および⑩式を用い、それより上層部においては⑨式および⑩式を用いて各々の領域での浮流砂量を算定し、其の和をとればよい。

3 あ と が き

上記のように、濃度分布と流速分布とを与えれば、其の積を数値積分する事によって浮流砂量を算定できるのであるが、拡散係数が底部で一定となる事、其れが成立する領域、 $Es$  と  $Em$  の関係に詳細な検討を加え、土砂混入による Kármán 定数の変化、基準濃度としての河床濃度、河床粗度などの合理的な評価を行なうためにも、更に多くの実験データから其の適合性を検討していく計画である。

## 参考文献

足立・伊藤 ; 球面粗度の実験的研究, 第23回年次學術講演概要 (5.43)

相対粗度の大きい流れについて, 第24回年次學術講演概要 (5.44)

岸・庄谷 ; 浮遊流砂に関する研究, 同上

Hunt J.N ; On the Turbulent Transport of a Heterogeneous Sediment,

Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol 22 (1969)

本間・石原, 応用水理学中I

芦田・道工 ; 浮遊砂量に関する実験的研究, 京大防災研年報 (5.41)