

早稲田大学 大学院 学生員○関根 正人

早稲田大学 理工学部 正員 吉川 秀夫

1. はじめに

流砂現象は主に掃流砂と浮遊砂とに分類され、Einstein¹⁾によれば、河床付近の掃流層 (bed layer) 内を移動する粒子が掃流砂であり、層外を移動する粒子が浮遊砂であるとされる。そこで、流砂の濃度分布を考える場合には、両者を別々の現象として扱えつつ、その境界面で濃度を接続させてきた。従って、浮遊砂の濃度分布についての研究はこれまで数多くの研究者によってなされ、濃度分布式としてよく知られているものとしては、Rouse²⁾の式、Lane-Kalinske³⁾の式、Hunt⁴⁾の式などが挙げられるが、そのほとんどが、この境界面 (基準高さ) での濃度 C_a を基準濃度とした、 $y = a$ から水面 $y = h$ までの相対的な濃度分布であると考えられる。しかし、このような分布式の場合には、①異なる流れに対して a および C_a をいかに適切に決めるか、②掃流運動をしていた粒子が浮遊状態へと遷移して浮遊砂の分布が形成されるわけであるが、掃流砂の濃度分布が元のままであるならば、浮遊状態にある粒子量はさらに河床から供給されることになり、浮遊砂濃度の基準濃度として掃流砂濃度をとることが妥当であるのか、等の問題がある。そこで、本研究では、浮遊砂の濃度の source も河床にあると考え、底面濃度 C_0 を基準濃度として濃度分布を表現することを考えた。

2. 本論

2.1 濃度分布式の誘導

拡散方程式としては、一様水路で流れが等流であり、浮遊砂流も平衡状態にあるとし、さらに水面での境界条件を入れた式(1)を対象とする。また、拡散係数 ϵ_{sy} の算定に当っては、次のように仮定した。①拡散係数が渦動粘性係数に等しいとする。②河床面から水面までのせん断応力分布を式(2)のようにする。③河床付近には粒径 d (あるいは相当粒度 k_s) に比例する大きさの渦が生じているとして、混合距離 l を式(3)のようにおくことにする。以上のような仮定の下で拡散係数 ϵ_{sy} を求め (式(4))、さらに式(1)を解くと、次の式(5)のような濃度分布式が得られる。式中の α は係数であり、 $\alpha \neq 0$ とすることにより河床面 $y = 0$ での拡散係数が 0 でない有限値をとるものとした。これは、現象自体が河床から離脱した粒子の移動・拡散であることから、 $y = 0$ で $\epsilon_{sy} = 0$ となるのは不合理であると考えられるからである。Rouse の式を河床まで拡張できないのは、 ϵ_{sy} を式(6)のように考えたために $y = 0$ で $\epsilon_{sy} = 0$ となることによる。一方、Lane-Kalinske の式の場合には ϵ_{sy} として、式(7)のように河床面から水面までの平均値をとっており、上記のような不合理は生じない。なお、参考までに式(4)、(6)、(7)による拡散係数の分布形を図示すると、図1のようになる。

2.2 濃度分布式の検討

式(5)から濃度分布を求めるに当っては、底面濃度 C_0 および係数 α を知る必要がある。まず、底面濃度 C_0 としては、密に詰まった河床単位体積中に存在する粒子重量を考えることにし、 $C_0 = 1000 \times (\gamma_s / \gamma) \rho_s [g/l]$ (

$$\epsilon_{sy} \frac{\partial C}{\partial y} + w_0 C = 0 \quad (1)$$

$$\tau = \tau_0 (1 - y/h) \quad (2)$$

$$l = \alpha d + \kappa y \quad (3)$$

$$\epsilon_{sy} = u_* (\alpha d + \kappa y) (1 - y/h)^{1/2} \quad (4)$$

$$\frac{C}{C_0} = \left(\frac{\sqrt{1-\eta} + K}{\sqrt{1-\eta} - K} \cdot \frac{1-K}{1+K} \right)^{\frac{w_0}{\kappa u_* K}} \quad (5)$$

$$\eta = y/h, \quad K = \sqrt{1 + \alpha d / \kappa h}$$

$$\epsilon_{sy} = u_* \kappa y (1 - y/h) \quad (6)$$

$$\epsilon_{sy} = \epsilon_m = u_* \kappa h / 6 \quad (7)$$

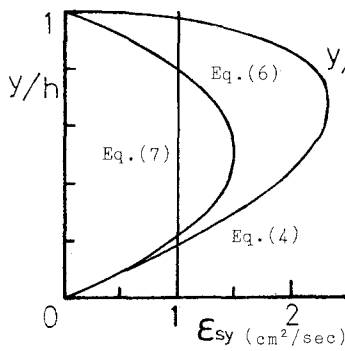


図1 拡散係数 ϵ_{sy} の分布

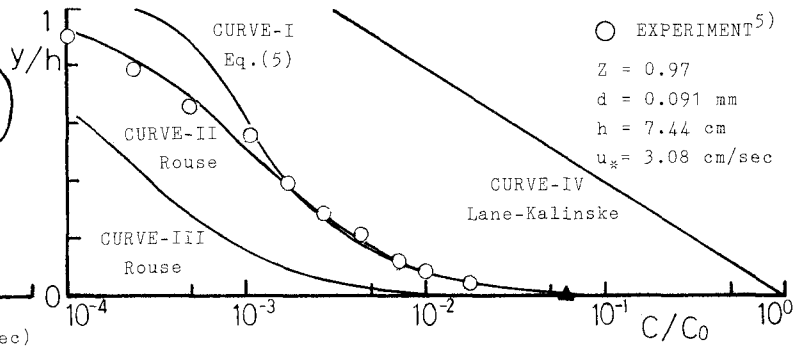


図2 浮遊砂の濃度分布式の比較

ρ_s : 粒子の密度 (g/cm^3) で表わすことにする。次に、 α については、乱れの計測等を通じて決めるべき量であるとも考えられるが、現段階では実測の濃度分布形からこの値を決めることにした。筆者らのポリスチレン粒子 (粒径 2mm , 比重 1.05) を用いての平坦河床での実測および Vanoni ら⁵⁾ の実測結果から、 α の値を算出すると、 $\alpha = 0.1 \sim 0.3$ 程度の値になることがわかった。

このようにして得られた C_0 および α を用いた式(5)による分布と実測値、さらには Rouse の式、Lane-Kalinske の式との比較を行なった一例を図2に示した。この図より、式(5)による濃度分布 (曲線 I) は、絶対量の小さい水面付近を除けば、実測値に比較的よく一致することがわかる。また、 $\alpha = 0.05h$ とし、 $Y = \alpha$ の実測値を基準濃度 C_a として Rouse の式から得られる分布 (曲線 II) は、図のように実測値と極めてよく一致しているが、例えば $\alpha = 2d$ として Einstein¹⁾ の考え方に従って求めた C_a (図中の $\blacktriangle$ 印) を基準にして Rouse の式から得られる分布 (曲線 III) は、実測よりかなり小さな値をとることがわかる。このことは、基準高さでの濃度 C_a が既知の場合にはよく適合するが、 C_a が未知の場合には C_a のわずかな誤差が分布形全体に大きな誤差を与えるということを表わしている。一方、底面濃度を基準にして Lane-Kalinske の式から得られる分布 (曲線 IV) は、図のように実測値よりかなり大きな値を示すことがわかる。これは、河床面付近で拡散係数を大きくしすぎているためと考えられる。このことは、この式が、数学的には $\alpha = 0$ とすることが可能であっても、数量的にはあまり意味がないことを表わしている。

3. む す び

浮遊砂の濃度分布として、河床面 $Y = 0$ での拡散係数 ϵ_{sy} にある値をもたせることにより、底面濃度 C_0 を基準濃度とした分布式(5)を考え、これと実測値および Rouse の式、Lane-Kalinske の式との比較から濃度分布式の検討を行なった。しかし、移動床の場合には河床面をどこに取るか、水深をどう決めるか等の問題があり、必ずしも精度の高い実測値が得られているわけではない。今後は、より精度の高い実測を行ない、係数 α の検討を含めて、現象を解明していくつもりである。なお、本研究の遂行にあたり片山浩志君 (日本国土開発)、加藤大典君 (住友建設) の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Einstein, H.A.: The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows, USDA, 1950.
- 2) Rouse, H.: Modern Conceptions of the Mechanics of Turbulence, ASCE, 1946.
- 3) Lane, E.W., and Kalinske, A.A.: Engineering Calculations of Suspended Sediment, AGU, 1941.
- 4) Hunt, J.N.: The Turbulent Transport of Suspended Sediment in Open Channels, Proc. Roy. Soc. London, 1954.
- 5) Vanoni, V.A., and Nomicos, G.N.: Resistance Properties of Sediment-Laden Streams, ASCE, 1960.