

II-86 浮遊砂濃度の測定方法について

京都大学防災研究所 正会員 道工 正規
兵庫県土木部 正会員 白川 清

1. 緒言

河川の全流砂量のうちで浮遊砂量の占める割合は非常に大きく、その傾向は流量の増加とともに大きくはなるのである。浮遊現象は河川の乱流と非常に密接な関係があり、現在河川で測定されている浮遊砂濃度は数10秒程度のサンプリング時間で平均化されたものであつて、河川の乱れのスケールと比較したときに、サンプリング時間が短かすぎるのであり、その結果濃度分布に非常にばらつきがみられるものと考えられる。浮遊砂濃度の変動は水流の乱れと類似的な変動現象であつて、濃度の連続測定によってその特性を把握することがサンプリング時間の決定などに重要である。

浮遊砂濃度の連続測定装置のあまのりとしては、X線計測法と線源を使用したものと光学的原理に基づくものと考えられる。前者はX線計測法はγ線の減衰が砂を含む流体質量に比例してあり、直接濃度測定ができるという長所を有しているが、しかし多額の費用を要する。一方後者は比較的簡単に作ることができる反面、濃度を間接的に測定するに浮遊砂の粒度分布を知る必要がある。その他に、超音波を利用した濃度計も研究されている。光学的原理に基づいた濃度計の研究は本間・堀川・岡田¹⁾およびBhattachaya, Glover, Kennedy²⁾によって行われており、濃度の連続測定が可能になりつつある。著者も同様の手法によって、一様砂および混合砂の濃度測定法について検討し、濃度変動の測定例をここに報告する。

2. 濃度計の原理

光の波長が砂粒子径に比較して十分小さい場合には、光量の減少は砂粒の断面積による遮蔽効果が支配的であることが知られている。したがつて、遮蔽による光量の減少を本間ら¹⁾にならうて式で一般的に表すことができる。

$$I/I_0 = \exp\left(-\frac{\pi}{4} L K \sum n_i d_i^2\right) \quad (1)$$

ここに、 I_0 , I : 光源および光源から L はたれ R 受光面での光量, L : 光源と受光面との距離, n_i : 単位体積中の粒径 d_i の砂粒の個数である。また、容積濃度 C_v , 平均粒径 D および平均面積径 Δ はつぎのようにならうて表わされる。

$$C_v = \pi/6 \sum n_i D^3, \quad \sum n_i d_i^3 / \sum n_i = D^3, \quad \sum n_i d_i^2 / \sum n_i = \Delta^2 \quad (2)$$

(2)式を(1)式に代入して整理すれば、

$$I/I_0 = \exp\left\{-\frac{3}{2} L K (\Delta/D)^2 C_v / D\right\} \quad (3)$$

のようになる。これらの式は個数百分率の粒度分布に基づいて得られたものであるので、通常用いられている重量百分率の粒度分布と個数百分率のそれとの関係を用ひるかにしてあふ必要がある。

いま、個数百分率の粒度分布を $g(d)$, 重量百分率のそれを $f(d)$ とすると、これらの関係は、

$$g(d) = A f(d) / d^3 \quad (4)$$

のようになる。ここに、 A : 規格化条件の定数である。したがつて、 D および Δ はつぎのようにならうて表示

とれる。

$$D^3 = \int_a^b d^3 g(d) dd / \int_a^b g(d) dd = \int_a^b f(d) dd / \int_a^b f(d) / d^3 dd \quad (5)$$

$$\Delta^2 = \int_a^b d^2 g(d) dd / \int_a^b g(d) dd = \int_a^b f(d) / d dd / \int_a^b f(d) / d^3 dd \quad (6)$$

いま $f(d)$ が対数正規分布に従うものとし、 $\xi = \log_e d$ とおけば、 $f(\xi)$ はつぎのように表示される。

$$f(\xi) = 1/(\sqrt{2\pi}\sigma) \exp\{-\{\xi - m\}^2 / (2\sigma^2)\} \quad (7)$$

ここに、 m ; ξ の平均値、 σ ; 標準偏差で $1/2 \log_e(d_{84}/d_{16})$ である。(7)式を(6)式に代入して、規格化条件を考慮すると、 $g(\xi)$ は

$$g(\xi) = 1/(\sqrt{2\pi}\sigma) \exp[-\{\xi - (m - 3\sigma^2)\}^2 / (2\sigma^2)] \quad (8)$$

のようになる、但数百分率の粒度分布も対数正規分布に従うことがわかり、 D は平均値のみで $(m - 3\sigma^2)$ に変化する。

さて、(5)あるいは(6)式に(7)式または(8)式を代入すると、

$$D = \exp(m - 5\sigma^2/6) \quad (9)$$

$$\Delta = \exp(m - \sigma^2) \quad (10)$$

の関係が得られるので、(9)あるいは(10)式を(3)式に代入して整理すればつぎのようになる。

$$I/I_0 = \exp(-3/2 LK e^{\sigma^2/2} \cdot C_v / e^m) \quad (11)$$

さらに、平均値 m は $m = 1/2 \log_e(d_{84} \cdot d_{16})$ であることが知られるとすれば、(11)式は

$$I/I_0 = \exp(-3/2 LK e^{\sigma^2/2} \cdot C_v / d_m) \quad (12)$$

のようになる。ここに、 $d_m = \sqrt{d_{84} \cdot d_{16}}$ である。また(12)式を Taylor 展開して 1 次の項までとるとすれば、

$$(I_0 - I)/I_0 = \Delta I/I_0 = 3/2 LK e^{\sigma^2/2} \cdot C_v / d_m \quad (13)$$

のようになる、(13)式は一般砂の場合に比して、 $e^{\sigma^2/2}$ が付加されており、近似的に対数正規分布が適用できる粒度分布に対しては(13)式が成立するものと考えられる。(13)式中の遮蔽係数(吸光係数)は Rose³⁾ によれば、 30μ 以上の粒径の砂粒では $K=1$ となるようである。

3. 濃度計の概要

(12)式は(13)式から明らかになるように、濃度の増加による光量の減少量を電氣的に測定すれば、粒度分布の標準偏差あるが平均粒径を知ると濃度測定が可能である。(12)式において一般砂の場合を考えると、 $\sigma=0$ になるので、光量の減少は L と C_v/d_m に関係する。これらの関係が図-1 に示されているが、当然の事ながら光源と受光面の距離 L が大きくなると、 C_v/d_m の小さい範囲しか測定できない。ここでは実験室用として、 $L=3\text{mm}$ になるように設計した。濃度計の受感部の概要が図-2 に示されている。光源としては安定でかつ波長 0.94μ (近赤外) で非常にシャープなスペクトル特性を用いているシャープカリウム砒素発光ダイオードを用い、受光器としてはこの発光ダイオードからの光量を受け取るに適したシャープシリコンホトトランジスタ PT-100 を使用し、受光面における光量の増減と電圧変換して濃度を測定することにした。光源には定電圧をかりてその安定性を保つたようにした。また、出力は直流増

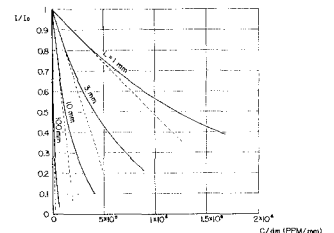


図-1 光量、 C/d_m あるいは距離 L の関係

幅器を通して測定し、あるいは増幅して記録計に表示するようにしている。さらに河川用の濃度計としては、以上の原理に基づいて試作し、濃度範囲が広く測定できるような距離Lが可変の装置を製作している。

4. 濃度計の検定

濃度計の検定を行おうために、実験水路で濃度計とサイフォン式サンプラーを接続し、河床から同一高さで濃度測定を行なった。

(1) 一称砂：使用砂は $d_m = \sqrt{d_{84} \cdot d_{16}}$; 0.097 mm (A砂), 0.034 mm (B砂), $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$; 1.15 (A, B砂とも) である。これらの砂を一称砂であると検定して、 C_v を ppm 単位の重量濃度で表わし、 $L=3\text{ mm}$, $k=1$ とすれば、(13) 式はつぎのように書ける。

$$\Delta I/I_0 \equiv \Delta V/V_0 = 1.7 \times 10^{-6} C/d_m \quad (14)$$

ここに、 ΔV , V_0 ; ΔI および I_0 に対応した電圧、 C/d_m ; ppm/mm 単位である。

濃度計による実測値 (○印) と (14) 式の関係 (図中の実線) を図-3 に示してある。両者の関係は非常に一致しており、このことから表長が砂粒径よりも十分小さい場合にあっては、一称砂を使用する範囲において十分な精度でこの装置を濃度計として使用しうることが明らかにされた。また室内であれば、自然光の影響はほとんど問題にならなかつた。

(2) 混合砂：混合砂では粒度分布の広がりがあり、粒度分布が対数正規分布とするとして、この効果を (13) 式に基づいて考察した。(13) 式中の $e^{G/2}$ と $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ の関係を示すと図-4 のようになり、 C_v/d_m が一定であっても $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ の増加に伴って $\Delta V/V_0$ が増加することがわかる。

ここでは浮遊砂の粒度分布は V-A-Tube によって沈降速度を求め、これに Stokes および Allen の式を適用して求めた。その結果が図-5 に示されている。

なお図中の直線は (13) 式で示す理論曲線で、その傾斜は 1.7×10^{-6} である。一称砂のようには実測値と理論式とは一致していないが、これは粒度分布を対数正規分布で近似し

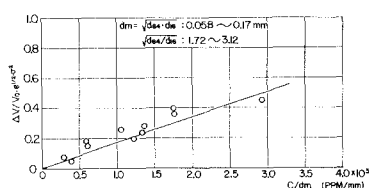


図-5 混合砂による濃度計の検定

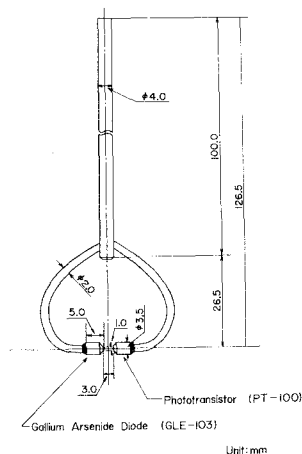


図-2 濃度計検出部

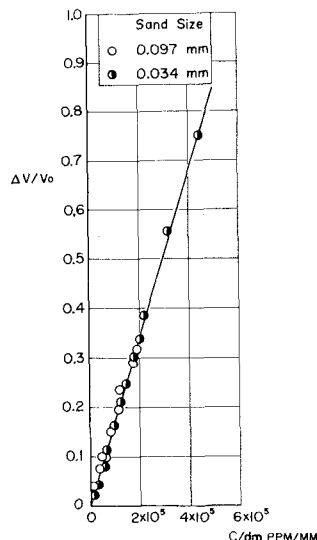


図-3 一称砂による濃度計の検定

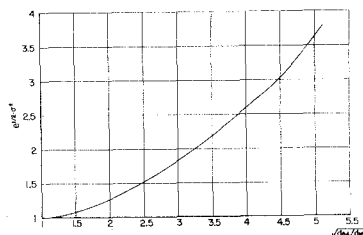


図-4 $e^{G/2}$ と $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ の関係

にこれなどが原因であろうと考えられる。しかしこの方法は混合砂に対して比較的簡単な関数形で濃度を測定しよう方法だと考えられる。

5. 濃度計による濃度変動の測定結果

一様砂(A砂)の濃度変動を測定した1例が図-6に相関係数、図-7にスペクトルとして図示されている。図中の流速はプロベラ式流速計によって4成分のもつと測定した結果である。流速変動と濃度変動を比較したところ、濃度変動のスケールは流速に比してかなり小さく、また、そのパワースペクトルもこの配もKolmogoroffによる $-5/3$ 乗則よりも小さくなっており、ホワイトノイズ的である。Miyake⁴⁾が海上で測定した濃度変動においてもこれと同様の傾向があることを報告しているが、今後の成分の測定を行なって土砂の拡散係数や浮遊機構の解明をしていこうたいと考えている。さらに実河川の洪水時において木下⁵⁾が航空写真の解析から見出した“モフエウ”などについても測定したいと考えている。

最後に、この研究を進めるにあたり、御指導を賜った京大防災研究所矢野勝正教授に深く感謝の意を表明するとともに、計測器の作製において労をわづらわしたメトロ電機研究所沢野技師に心から感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 本間・堀川・周淵：浮遊砂濃度の測定法について，第18回土木学会年次学術講演会 昭38，pp.151-154.
- 2) Bhattacharya, Glover, Kennedy: An electro-Optical probe for measurement of suspended sediment concentration, 13th Cong. IAHR, Vol.2, 1969, pp.241-250.
- 3) 久保ら編：粉体—理論と応用—，文芸，昭37，p.182.
- 4) Miyake, Stewart, Burling: Spectra and Cospectra of turbulence over water, Quart. J. R. Met. Soc. 96, 1970, pp.138-143.
- 5) 木下良作：航空写真による洪水流の解析，その乱流構造と表面の流れの特性について，写真測量，6(1)，1967.

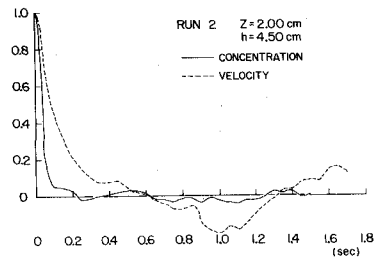


図-6 自己相関係数

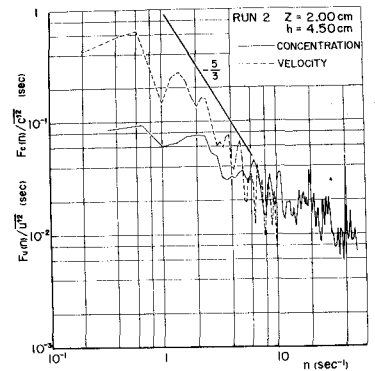


図-7 規格化されたパワースペクトル

$$\bar{C} = 11900 \text{ ppm}, \sqrt{\bar{C}^2} = 454 \text{ ppm}$$

$$\bar{U} = 48.5, \sqrt{\bar{U}^2} = 2.1 \text{ cm/s.}$$