

京都大学大学院農学研究科 正会員 ○藤田 正治

京都大学大学院農学研究科 正会員 水山 高久

京都大学農学部

滝口 茂隆

1. はじめに

浮遊砂の拡散理論は実用上便利な方法であるが、山地河川を対象にした急勾配でかつ相対水深が小さい条件では、流速分布則が対数則に一致するのに、濃度分布は拡散係数を通常の2~3倍大きくしなければ拡散方程式の解と適合しない。^{1), 2)} 図-1はその一例¹⁾を示したもので、拡散係数と渦動粘性係数の比 β を通常の1から2.06にしなければ計算値は実験値を説明できていない。本論では、 β を大きくしなければならないのは拡散方程式に浮遊砂の生成項を考慮していないからであるという考え方のもとに、 β を1にしたままで広い条件に対して適用できる拡散理論について検討する。

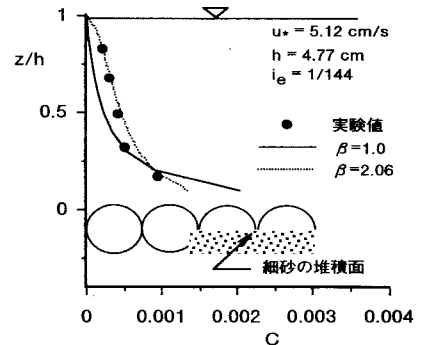


図-1 急勾配で相対水深が小さいときの濃度分布

2. 浮遊粒子の生成と拡散方程式

流水中を運動する粒子には、上昇流体塊の作用で河床を離脱し浮上中の浮上粒子とランダムな乱れを受けている浮遊粒子があるが、拡散方程式は浮遊粒子を対象として記述される。浮上粒子はその運動が終了する高さで浮遊粒子の生成源となり、浮遊粒子は河床面で消滅する。では、このような事柄が式(1)に示す平衡状態の拡散方程式と式(2)の河床境界条件式でどのように扱われているのかについて見よう。まず、式(1)には浮遊粒子の生成も消滅も考慮されていないことがわかる。その代わり、基準点という便宜的な境界で浮遊粒子の生成と消滅を考慮した条件を設定している。この事は、実現象で生成位置は浮上粒子の到達高さ、消滅位置は河床であるという事と異なっており、そのため式(1)、(2)では基準点で浮上率が拡散項と等しくなるとか、ラウス分布のように河床面で濃度勾配が無限大になるという不明確な事柄が生じる。

$$w_o C + \varepsilon \frac{dC}{dz} = 0 \quad (1)$$

$$z = a_*; \quad C = C_a (=q_{su}/w_o) \quad (2)$$

(w_o : 粒子沈降速度, C : 濃度, z : 鉛直方向の座標, a_* : 基準点高さ(水深の5%), q_{su} : 河床粒子の浮上率)

3. 浮遊粒子の生成を考慮した拡散方程式

浮遊粒子の生成を考慮した拡散方程式は、水面で浮遊粒子の出入りがないとすると式(3)のようになる。ここに、 P : 単位時間単位体積当たり生成される浮遊粒子の体積である。また、 ε は $\beta=1$ として求める。河床では鉛直方向の流速が0であるので境界条件は式(4)となり、浮遊粒子は河床では純堆積することになる。 P の条件式は、河床から浮上したものがすべて浮遊粒子になるとすると式(5)のようになる。式(3)~(5)から河床では式(6)が成り立ち、河床変動が平衡状態に達していることが表現される。ここに、 C_* : 河床における濃度である。

$$w_o C + \varepsilon \frac{dC}{dz} = \int_z^h P dz \quad (3) \quad \varepsilon \frac{dC}{dz} = 0 \quad (4) \quad \int_0^h P dz = q_{su} \quad (5) \quad C_* w_o = q_{su} \quad (6)$$

中川・辻本³⁾も掃流砂から浮遊砂への遷移を考慮して式(3)と同様の式を提示しているが、浮遊粒子の生成に関する考え方や河床境界条件が本論と異なる。上記のような生成項を含んだ拡散方程式で、 ε を一定とし、 P の分布に基準点の位置以外で0になるようなデルタ関数を与えると式(3)の解は $z \geq a_*$ で式(1)の解と一致する。したがって、従来の拡散理論は、基準点の位置に集中して浮遊粒子が生成されていることになり、従来の拡散方程式の解が式(3)の特殊な条件における解であることを意味する。

式(3)の解析例として、拡散係数=一定、 P =一定の場合の濃度分布は図-2の様である。ただし、 $E(=\varepsilon/h/u_*)=1/15$ 、 $\zeta(=w_o/u_*)=0.01$ および1としている。ここに、 h :水深、 u_* :摩擦速度である。生成項と拡散項に起因した濃度分布も示されている。 ζ が大きいとき拡散の影響が小さくなり、濃度分布は生成項だけによって決まる。 ζ が小さいときは拡散の効果が現われ、 $\zeta \rightarrow 0$ のとき一様な濃度分布に近づく。

4. 実験値と計算値の比較

図-1の濃度分布の実験値と式(3)の計算値の比較を行う。浮遊粒子の生成率の鉛直分布は浮上粒子の最終浮上高さの確率分布によって求められる。藤田⁴⁾はその算定方法を揚圧力係数 c 、遮蔽係数 k 、上昇流の作用時間係数 c_t をパラメータとして提示している。モデルの詳細は文献を参照されたい。また、濃度の計算には浮上率が必要であるが、浮上

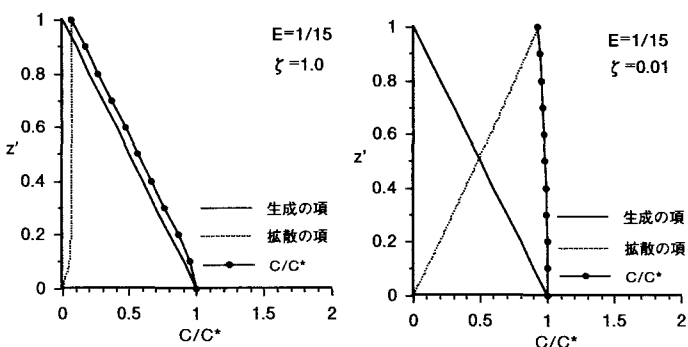


図-2 一様な生成率のときの濃度分布

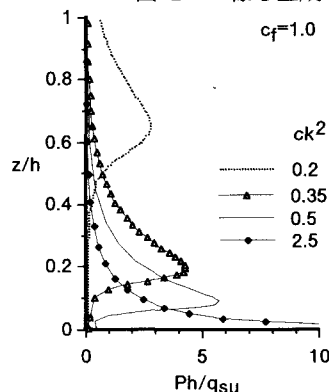


図-3 生成率の計算値

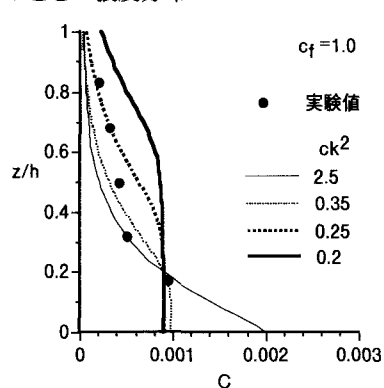


図-4 濃度分布の実測値と計算値

率の計算精度の影響を除くために、 $z/h=0.2$ において実測濃度と計算濃度が一致するように浮上率を決めた。また、本解析で求められる濃度には浮上粒子は含まれていないが、測定値には含まれている。したがって、両者を直接比較することはできないが、 ζ が小さいときは浮上粒子の濃度は無視できると思われる。

図-1の条件に対して生成率の鉛直分布は図-3のようである。遮蔽効果が大きい(k が小さい)と河床粒子は強い上昇流のときだけ河床を離脱し大きな上昇流速が作用することになり、浮上高さの確率分布が上方にシフトする。図-4は濃度分布の計算値と実験値を比較したもので、遮蔽が大きくなり、 k が小さくなるほど濃度が一様化され、実験値と適合するようになっていく。図から判断すると $ck^2=0.25\sim0.35$ の間で一番適合性がよくなっている。図-1には河床の状態も示されているが、実現象でも河床の礫によって細砂がかなり遮蔽を受けていることが推察される。

以上の様に、浮遊粒子の生成位置が高くなると浮遊粒子の濃度分布はより一様になり、式(1)で見かけ上の拡散係数を求めると β の値は1より大きくなる。しかし、生成項を入れた拡散方程式を用いると β を1にしたままで、濃度分布の一様化を説明できる。

5. おわりに

本研究では、浮遊粒子の生成項を考慮した拡散方程式を使って浮遊砂濃度分布を計算する方法について検討した。この方法を使えば、従来行われているような拡散係数と渦動粘性係数の比を大きくするような便宜的な方法を用いなくても、広範囲な条件に対して濃度分布を計算することができる可能性があることがわかった。なお、本研究を遂行するにあたり、鳥取大学宮本邦明助教授、早稲田大学関根正人助教授、新潟大学権田豊助手に貴重なご意見を賜った。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献 1) 道上, 藤田ら, 平成5年中国四国支部発表会, p.190-191, 1993, 2) 権田ら, 平成4年砂防学会発表会, p.70-73, 1992, 3) 中川, 辻本ら, 土木論文集, 第417号, p.149-156, 1990, 4) 藤田, 京大博論, 1986。