

浮遊砂流の乱流構造と砂の連行係数の評価

福島工業高等専門学校 物質・環境システム工学専攻 学生会員○鈴木 智美
福島工業高等専門学校 建設環境工学科 正会員 菊地 卓郎
長岡技術科学大学 環境・建設系 正会員 福島 祐介

1. はじめに

自然界に存在する様々な乱流現象の中で、固体粒子の浮遊を伴い、固体と液体の二相からなる流れを固液二相流という。河川で観測される浮遊砂流は、典型的な固液二相流であり、河川の維持・管理、環境保全を考える上で基本的に重要である。

本研究では、浮遊砂流に対して粒径分布を考慮した $k-\varepsilon$ 乱流モデルを適用し、砂粒子の粒径が浮遊砂流の乱流構造に与える影響について検討し、さらに、乱流拡散方程式を用いた浮遊砂流の解析に重要な底面での境界条件について考察を行った。

2. 数値解析モデル

数値解析モデルは、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルを採用した。流れは定常・等流であると仮定し、十分に発達した乱流状態の流れであると考えた。基礎方程式は連続式、レイノルズ方程式、乱流運動エネルギー k 、分子粘性逸散率 ε 、粒径分布を考慮した浮遊砂の乱流拡散方程式であり、乱流拡散方程式を以下に示す。

$$\frac{v_t}{\sigma_t} \frac{dc_k}{dz} = -w_{sk} \cos \theta c_k \quad (k=1,2,3) \quad \dots (1)$$

ここで、 c_k 、 w_{sk} はそれぞれ、 k 番目の粒径 D_{sk} に対する砂粒子の体積濃度、沈降速度である。また、 v_t は動粘性係数であり、次式で表わされる。

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \dots (2)$$

3. 計算結果と考察

数値解析との比較に用いた実験は、Vanoni and Nomicos (以下 VN) と Vanoni (以下 V) と Einstein and Chien (以下 Ein) の合わせて 14 ケースの実験条件である。計算では実験より得られたデータである単位幅流量 q 、単位幅流砂量 q_s 、水深 h 、粒径 D_s を初期値として与え、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルに含まれるパラメータ $c_{3\varepsilon}$ 、 σ_t 、 k_s/h を変化させ、流速・濃度分布が最も一致するようにパラメータの値を同定した。さらに粒径の大き

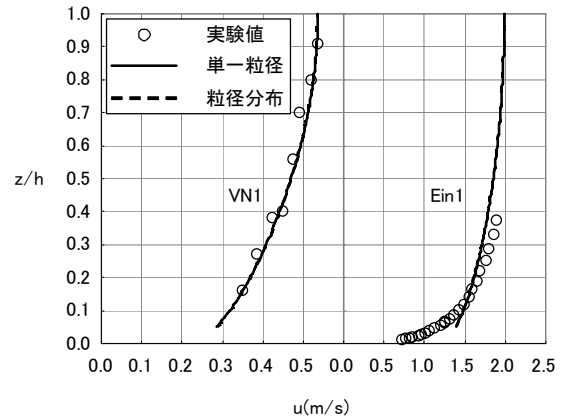


図1 流速分布の実験値との比較

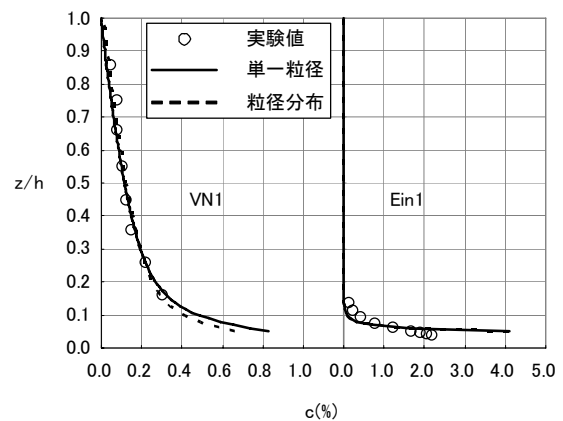


図2 濃度分布の実験値との比較

さの違いによる乱流構造の違いを検討するために、VN1の粒径のみを変化させて数値解析を行った。

図1、2はVN1とEin1の流速・濃度分布について、単一粒径の場合と粒径分布を考慮した場合の数値解析結果にVN1の粒径のみを変化させて、数値解析を行った結果も含めたものである。流速・濃度分布ともに、単一粒径の場合、粒径分布を考慮した場合の両方の解析において、実験値との分布形の一致は良好である。本数値モデルは、様々な幅広い水理条件の浮遊砂流に対して、流速・濃度分布ともに高い再現性を持つことが確認できた。粒径が0.01mm程度に小さくなると、流速分布には大きな影響を与えることなく、濃度分布において底面付近で分布形の違いが現れた。

図3は単一粒径の場合のVN1とEin1の数値解析によ

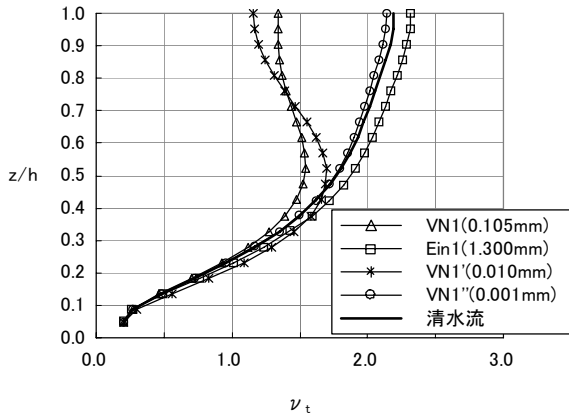


図3 無次元渦動粘性係数

って得られた無次元の渦動粘性係数と粒径の大きさの違いによる乱流構造の違いを検討するために VN1 の粒径のみを変化させて、数値解析を行った結果も含めたものである。渦動粘性係数は乱流構造の変化を評価する値であり、粒径の大きさによって水面付近で大きな違いが見られる。清水流に比べ、VN1、VN1'のように粒径が小さいと小さく、Ein1 のように粒径が大きくなると清水流と同等の値となる。これは粒径が大きくなると、砂粒子の沈降速度が大きくなり、砂粒子が底面付近を流れることとなるため、水深全域にわたる乱流構造の変化につながらずに、清水流と同程度の渦動粘性係数の大きさとなったものと考えられる。さらに粒径が VN1'' のように小さくなると、渦動粘性係数は Ein1 の実験条件のような粒径の大きい場合と同様に、清水流に近づき、乱流構造の変化に影響を与えないことが分かった。

4. 砂の連行係数

乱流拡散方程式を用いた浮遊砂流の解析を行う際に、底面での境界条件をどのように与えるかは重要である。ここでは、最も合理的な方法である濃度フラックスを与える勾配型の以下の条件式で境界条件を設定する。

$$\frac{v_t}{\sigma_t} \frac{dc}{dz} = -w_s \cos \theta E_s \quad \dots (3)$$

ここで、 E_s は底面からの浮上フラックスを砂の沈降速度で無次元化したものであり、砂の連行係数と呼ばれる。等流では式 (3) は浮遊砂濃度 $c_0 = E_s$ とすることと同等である。砂の連行係数は砂粒子の特性と流れの乱流特性によって決まると考えられている。砂の連行係数について、Garcia は次のような実験式を提案している。

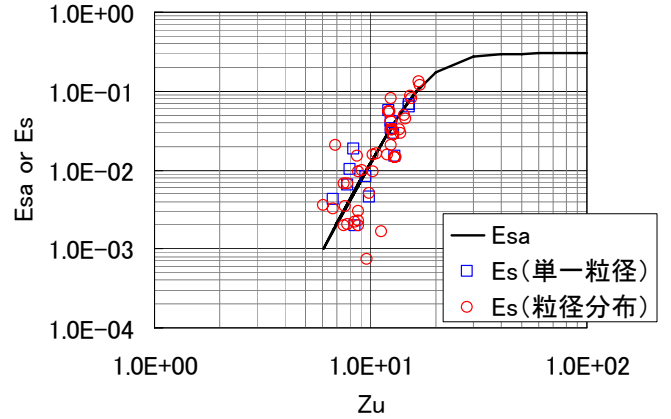


図4 砂の連行係数と Garcia の経験式との比較

$$E_{sa} = AZ_u^5 \left(1 + \frac{A}{0.3} Z_u^5 \right) \quad \dots (4)$$

$$Z_u = R_p^{0.6} u_* / w_s, R_p = \sqrt{gRD_s} D_s / \nu, A = 1.3 \times 10^{-7}$$

ここで、 R_p は粒子レイノルズ数、 u_* は底面での摩擦速度、 D_s は砂粒子の直径、 ν は水の動粘性係数である。

図4は Garcia のパラメータ Z_u に対して単一粒径、粒径分布を考慮した場合の砂の連行係数 E_s を示したものである。図中、実線で示したのが砂の連行係数に対する Garcia の経験式 (式 (4)) であり、今回用いた数値解析モデルの中で既に求めている摩擦速度と沈降速度を Z_u に代入することで、 E_{sa} を求めることができる。砂粒子の粒径は粒子レイノルズ数 R_p を通じて Garcia のパラメータ Z_u に影響を与える。砂の連行係数 E_s は Garcia の経験式 E_{sa} に良く一致した結果となった。パラメータ Z_u の値は、相対比重、粒径、摩擦速度、沈降速度などの関数であり、値が大きくなれば砂の連行係数も大きくなり、固体粒子が浮遊しやすいことを意味する。一般には、砂粒子の浮遊限界は $Z_u = 5.0$ とされている。 $Z_u \geq 5.0$ となることで、砂粒子は巻き上げられ浮遊することになる。今回の数値解析では、 Z_u は 10 前後の値となっている。

5. 結論

粒径分布を考慮できる数値モデルにより浮遊砂流の流動特性を再現した。さらに渦動粘性係数を評価することで、乱流構造を評価した。砂の連行係数は、Garcia の実験式との比較を行い、単一粒径、粒径分布を考慮した場合ともに、同程度のオーダーを得ることができた。