

$k - \varepsilon$ 乱流モデルによる浮遊砂流の解析と砂の連行係数

福島工業高等専門学校 建設環境工学科 正会員 ○菊地 卓郎

福島工業高等専門学校 建設環境工学科 学生会員 鈴木 智美

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

乱流現象の中で、固体粒子の浮遊を伴い、固体と流体の二相からなる流れを固液二相流という。自然現象において、路床の侵食、堆積を伴う浮遊砂流は、典型的な固液二相流であり、河川における流砂の問題を考える上で基本的に重要である。

本研究の目的は、浮遊砂流について提案した解析モデルにより数値解析を行い、砂の連行係数について検討を行うことである。解析モデルとしては、固体粒子の濃度変化を考慮し、数多くの流れに適応され、成功を収めている $k - \varepsilon$ 乱流モデルを採用した。沈降速度が小さく流体の流動に粒子が追従する場合には、固体粒子である砂の輸送を乱流拡散方程式で記述できるものと仮定した。以上のモデルを適用し、開水路の浮遊砂流における流速分布、濃度分布の実験結果と解析モデルによる計算値との比較を行った。次に、底面における境界条件について、砂の連行係数を用いて考察を行った。

2. 数値解析モデル

浮遊砂流の流動解析において、固体粒子が乱流の作用により拡散されると仮定し、この固体粒子輸送を乱流拡散方程式で記述できるものとする。この他基礎方程式は、連続式、二方向のレイノルズ方程式、乱れ運動エネルギー k 、分子粘性逸散率 ε についての方程式を用いる。

3. 計算結果と考察

計算値との比較には、比較的精度のよい実験結果を得ている Vanoni & Nomicos の実験結果を用いた。表 1 に示したパラメータおよび水理条件を与え、 $k - \varepsilon$ 乱流モデルを用いた数値解析結果との比較を行った。

図 1、2 に流速分布と濃度分布の数値解析結果を

Vanoni & Nomicos (Run3, Run5) の実験値と比較して示す。この場合、流れが等流であると仮定し、鉛直方向の解析を行っている。

表 1 Vanoni & Nomicos の水理条件

Run No.	$h(\text{cm})$	$c_b(\%)$	θ	k_s/h	σ_t
Run1	8.66	0.567	0.0025	0.1510	0.8
Run3	7.44	0.923	0.0020	0.0040	1.1
Run5	7.83	1.216	0.0021	0.0028	1.4
Run7	7.77	0.319	0.0026	0.0030	1.0

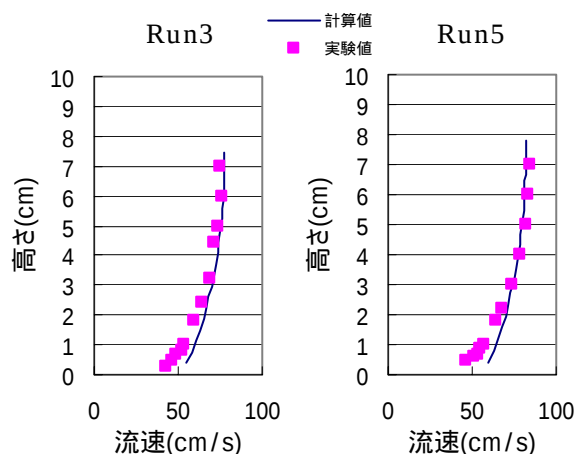


図 1 流速分布の比較

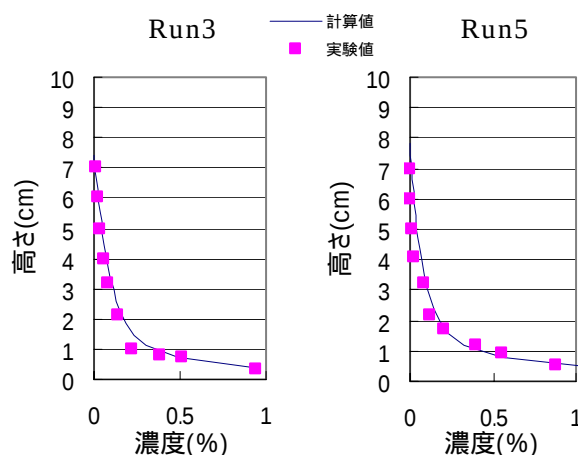


図 2 濃度分布の比較

キーワード : 浮遊砂流、 $k - \varepsilon$ 乱流モデル、砂の連行係数

連絡先 : 〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾 30
福島工業高等専門学校 TEL 0246-46-0834

計算においては無次元圧力勾配 I_p を調節することによって、流速の大きさを調整することができる。流速分布は Run3, Run5 とともに、底面における流速が若干大きくなる傾向を示すが、全体的に計算値と実験値の分布形はよく一致している。濃度分布との比較では、渦動粘性係数と渦拡散係数の比である無次元パラメータ σ_t を適切に選ぶことで、計算値と実験値を一致するようにした。

4. 砂の連行係数

土粒子の体積濃度を計算するためには、乱流拡散方程式を積分する必要があるが、その際、底面での境界条件が必要になる。ここでは、最も合理的方法である濃度フラックスを与える勾配型の次のような条件式で境界条件を設定する。

$$-\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c}{\partial z} = w_s E_s \quad (1)$$

ここで、 w_s は土粒子の沈降速度、 c は土粒子の体積濃度、 ν_t は渦動粘性係数、 σ_t は乱流シュミット数である。 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。砂の連行係数 E_s は、土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。この連行係数について、Garcia は開水路の浮遊砂流の実験データを整理し、砂の連行係数 E_{sa} について、次のような実験式を提案している。

$$E_{sa} = AZ_u^5 / \left(1 + \frac{A}{0.3} Z_u^5 \right) \quad (2)$$

$A = 1.3 \cdot 10^{-7}$ 、 $Z_u = R_p^{0.6} u_* / w_s$ 、 $R_p = \sqrt{gRD_s} D_s / \nu$ である。ここで、 R_p は粒子レイノルズ数、 $u_* = \sqrt{\tau / \rho}$ は底面での摩擦速度、 τ_0 は底面せん断応力、 ρ は水の密度、 D_s は土粒子直径、 g は重力加速度、 R は砂粒子の水中比重、 ν は水の動粘性係数である。Vanoni & Nomicos の実験データを用い、解析解から E_s を算定する。流れが等流であると仮定した場合、底面での浮遊砂濃度の値は、砂の連行係数 E_s に一致する。浮遊砂流に対して得られた連行係数 E_s を無次元パラメータ Z_u に対して示したのが図3である。図

中の実線は式(2)に示した Garcia の実験式である。本解析における砂の連行係数 E_s は、Garcia の実験式と同程度のオーダーであることが分かる。これより、今回の値の妥当性を確認することができた。

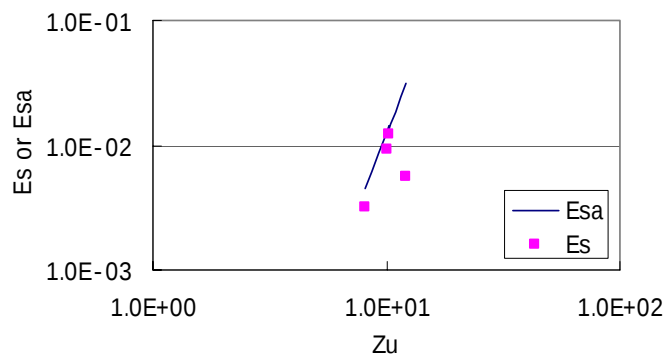


図3 砂の連行係数

5. 結論

浮遊砂流に対して $k - \varepsilon$ 乱流モデルを適用し、Vanoni & Nomicos の実験結果との比較検討を行った。また、底面における境界条件について、砂の連行係数を用いて検討を行った。その結果、流速分布、濃度分布とともに良好な結果が得られ、開水路浮遊砂流の乱流特性を説明できることを示した。また、砂の連行係数 E_s を算出し、Garcia の経験式と同程度のオーダーになることを示した。ただし、砂の連行係数については Vanoni & Nomicos の実験結果の数パターンのみによるものであるため、今後、さらに多くの計算例を増やし、検討を進める必要がある。

6. 参考文献

- 1) 福嶋祐介・菊地卓郎・西村浩一：地吹雪における雪の連行係数に関する考察、雪氷、64 巻 5 号、pp.533-540、2002.
- 2) 福嶋祐介・鏡原聖史・野口和義：非ブーシネスク $k - \varepsilon$ 乱流モデルによる固気・固液二相流の解析、土木学会論文集、No.621/ -47,41-52、pp.41-52、1999.
- 3) 福田雅晴・福嶋祐介：浮遊砂流に対する $k - \varepsilon$ 乱流モデルの適合性について、第 31 回水理講演会論文集、pp.587-591、1987.
- 4) Vanoni, V.A. & Nomicos, G.N. : Resistance properties of sediment-laden streams、Trans. American Soc. Civil Engs、Vol.125、pp.1140-1175、1960.