

浮遊砂の運動に及ぼす開水路側壁の影響

EFFECT OF WALL SHEAR ON PARTICLE MOTION IN SEDIMENT LADEN OPEN CHANNEL FLOW

藤崎一裕¹・田中 孝²

Kazuhiro FUJISAKI and Kou TANAKA

¹正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-0015 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²学生会員 九州工業大学大学院 工学部建設社会工学科 (同上)

The paper deals with the concentration distributions of sediment particles in turbulent rectangular open channel flow. Special attention is paid on the effect of channel wall shear on the concentration profiles of sediment particles. Using the Reynolds stress model, a mathematical model to describe the fluid and sediment motion in a prismatic open channel was presented. After confirming the validity of this model by laboratory experiments, sediment motions in a lateral cross section were discussed by this model. It was shown that the sediment particles flow downward with circularity trajectories like secondary current of fluid motion. Due to the settling of the sediment particles, the location of the center of the trajectory is somewhat near to the sidewall and to the bottom, compared with that of fluid motion. Experiments on sediment laden open channel flow, reported so far, were also reproduced numerically. In some cases of the reported paper, it was found that the circulatory motion of sediments spread almost over cross section. To the case of compound channels, the effect of relative height of the flood plane on sediment distributions were also investigated.

Key Words : *Open channel flow, suspended sediment, aspect ratio, Reynolds stress model*

1. まえがき

本研究は開水路浮遊砂流れにおける粒子濃度分布について検討したものである。開水路の流れに関しては、流速測定技術や数値計算モデルの開発が進展して、水路内の状況がより詳しく把握されるようになってきた。しかしこれらの研究はその多くが清水を対象としたもので、沈降性粒子を含む流れに応用した例は少ない。

水路内に懸濁する粒子には移流や乱流拡散の他に沈降作用が加わり、その挙動は非常に複雑なものとなる。このような粒子の挙動を詳細に検討することは河川や水路における浮遊砂流れの状況を把握する上で重要である。一方開水路浮遊砂流れに関しては室内実験でも多くの検討がなされている。そしてこれらの実験の多くは、鉛直2次元の現象を調べる場合でも比較的小さなアスペクト比(水路幅/水深)で測定が行われていることが多い。しかし、このことを特に取り上げて検討した例は見あたらない。

以上のようなことを考慮して本研究では、粒子濃度分布に及ぼす側壁の影響を調べることに主眼をおいた。水

路側壁から生じるShearの横断方向分布が水路内の粒子挙動や粒子濃度分布に及ぼす影響について調べる事を本研究の目的とした。まず室内実験の結果を数値モデルの解と比較しモデルの有効性を確認した後、従来発表されている浮流砂流の実験結果について考察した。水路断面は主として矩形のものを対象としたが、一部複断面水路に関しても類似の考察を行った。

2. 実験

実験は幅40cm、長さ8mの可変勾配矩形断面水路を用いて行った。懸濁粒子は水中に投入され、下流端部に設置された2基の水中ポンプにより直径8cmのパイプを通して上流端の受水槽に運ばれ水路内を流下する。

流速の測定には、直径3mmのピトー管とこれに連結した微差圧計を用いた。粒子濃度の測定には直接水中より懸濁水を採取し乾燥秤量して濃度を求めた。通常一ヶ所100ccを採取し、サンプル数は縦6横9の格子点で計54個とした。実験に用いた粒子は、市販の珪砂粉(比重2.65)を流動層方式で整粒したもので、平均径は48 μ m

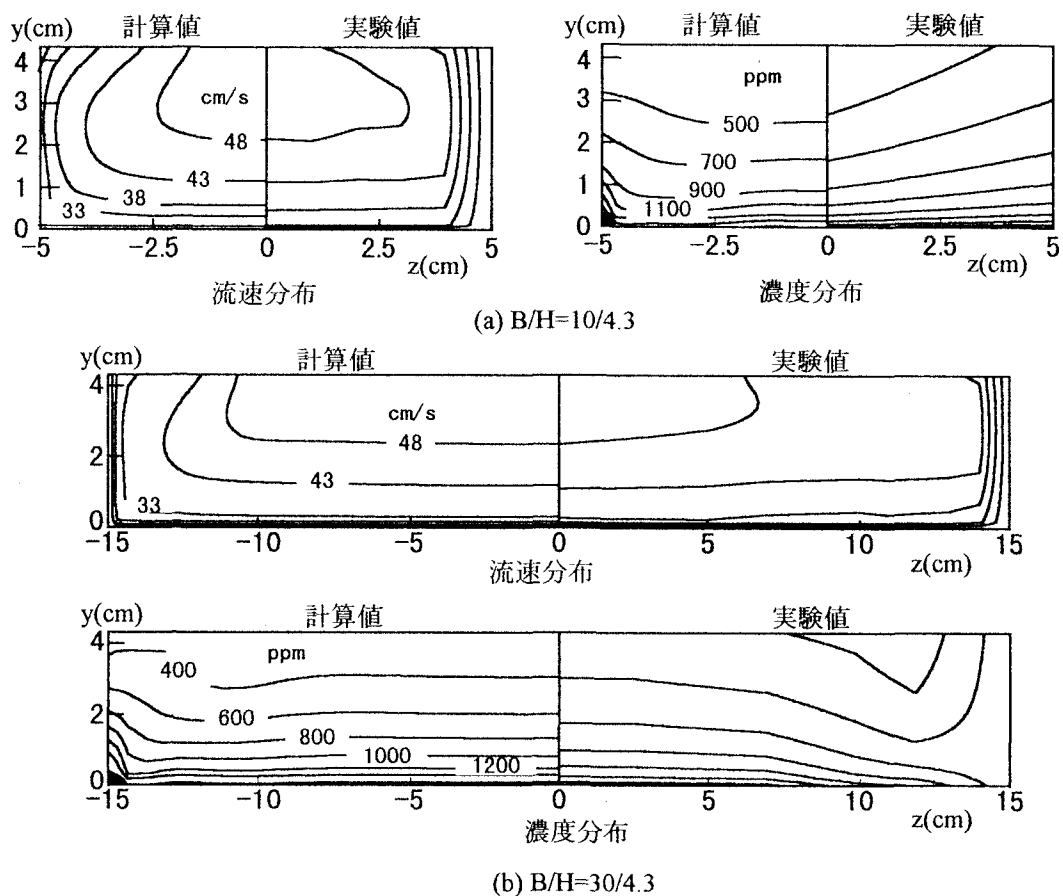


図-1 矩形断面水路における実験値と計算値の比較

表-1 実験条件

case	水路幅 B (cm)	水深 H (cm)	粒子沈降速度 W_0 (cm/s)	水路床勾配 I	摩擦速度 U_* (cm/s)	Z $W_0 / (\kappa U_*)$
R1	10	4.3	0.21	1/735	2.39	0.214
R2	30	4.3	0.21	1/735	2.39	0.214
C1	40	6.0	0.07	1/800	—	—

(CASE R1, R2)、 $27 \mu\text{m}$ (CASE C1)である。

矩形断面水路でアスペクト比の影響を調べる場合には水路内に鉛直の仕切り板を入れて縦横比を設定した。また複断面水路に対しては水路内に高さ4 cm、幅20 cmの高水敷に相当する部分を設置した。実験条件が表1に示されている。

3. 基礎式及び数値計算モデル

この解析では、流れは流下方向に十分に発達した定常状態を対象とし、粒子と流体との相互作用や密度流効果は考えない。

基礎式として流体の保存則と流下方向、水深方向、横断方向の運動方程式に加えてReynolds stressを求める式を連立させた。流体運動に関する基礎式とその数値計算方法の概略はLin & Shiono (1995) の論文に記されて

いるものとほぼ同様である。

流速、渦動拡散係数の分布、二次流など流れの状況を求めた後、これを用いて通常の粒子保存則より粒子濃度分布を求めた。また、粒子が水路内で保存される場合を対象とした。これは水路底部で沈積がない場合や、底部での沈積と巻き上げが平衡状態にあり最終的に水路内の全粒子が保存される場合に相当する。

乱流モデルとしては、Naot & Rodi (1982) により開発されたReynolds stressモデルを用いた。この種の現象の解明には、さらに進んだモデル(佐藤ら, 1999)も開発中であるが、ここではこのような流れの記述に対して有用性が確認されているモデルの中で、比較的簡単なものを用いた(Naot & 瀬津, 1991 Naot et al, 1993)。

具体的な計算には、スタッガード格子を用い、SIMPLER法により運動方程式と連続の式が連結されている。また運動方程式の境界条件としてwall lawを用いた。分割数は水深・水路幅方向にいずれも20~40とした。

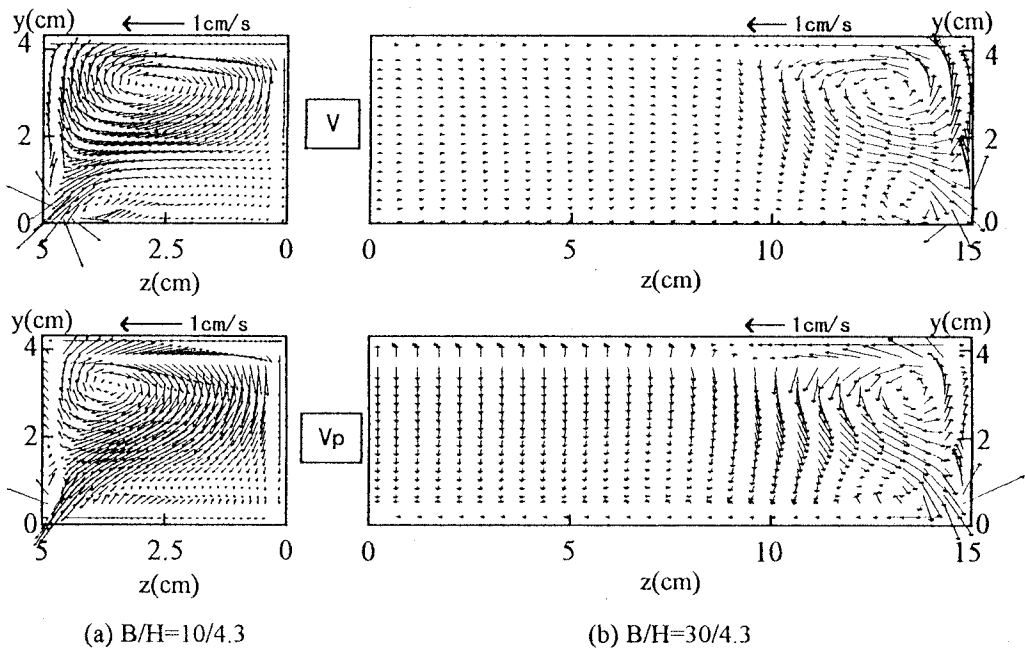


図-2 流体・粒子の二次流的挙動

4. 考察

(1) 実験値と計算値の比較

a) 矩形断面水路

図1に矩形断面の場合の計算値と実測値の比較例を示す。これらの図には流況に及ぼす側壁の影響が示されている。流速分布に関してはこれまでに発表されているものと同様な結果であり、図1(a)のB/Hが10/4.3の場合には壁近傍で等速度線が側壁に平行に近い。これに対して、粒子濃度の等位線は横断方向に変化が少なくやや水平に近く、両者は好対象をなしている。

また、アスペクト比の大きい図1(b)の場合には側壁の影響は流速の場合と同様、中心側へ水深の1～1.5倍程度であるが、水面近傍に一部低濃度部が表れている。

これらの現象は水路内の粒子の挙動を調べることでより説明される。粒子の保存式に表れる粒子flux F_p は次の式で与えられる。

$$F_p = \left((V - V_0)C - v_t \frac{\partial C}{\partial y} \right) \mathbf{j} + \left(WC - v_t \frac{\partial C}{\partial z} \right) \mathbf{k} \quad (1)$$

ここで、C: 粒子濃度、 V_0 : 粒子沈降速度、 $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$ 及び V , W : それぞれ水深方向 y 、水路幅方向 z 方向の単位ベクトル及び流速、 v_t : 渦動拡散係数である。

この式を濃度Cで除すと次式となる。

$$V_p = \frac{F_p}{C} = \frac{\left((V - V_0)C - v_t \frac{\partial C}{\partial y} \right) \mathbf{j} + \left(WC - v_t \frac{\partial C}{\partial z} \right) \mathbf{k}}{C} \quad (2)$$

(2) 式は、速度の次元を有しており、粒子が乱流拡散、

沈降、二次流の作用で動くことを意味し、いわゆる見かけの断面内粒子移動ベクトルとも言うべきものである。

断面内二次流とこの仮想粒子速度 V_p とをそれぞれ図1(a)と(b)の場合について図2に示した。これらの図から、粒子も螺旋運動的軌跡を描きながら流下するが、その軌跡の中心は、流体運動のそれに比べて側壁側、水路床側に偏っていることが分かる。

アスペクト比の小さい図2(a)の場合には断面内二次流の影響が水路全断面に及んでいるのに対して、水路幅が広い図2(b)の場合には、旋回流の運動の範囲も水路側壁からほぼ水深程度の距離までの変化となる。また、図1(b)に水面近傍に低濃度域が生じるのも、二次流による低濃度域の沈み込みによることが図2(b)からも理解できる。

b) 複断面水路

図3に複断面水路の比較例を示す。これらの図には、高水敷と低水路境界部において発生する斜昇流とこれに伴う循環流の影響が表れている。すなわち、境界部水面近傍では、上昇流のため下部の高濃度域が持ち上げられて高濃度化し、また逆に、下降流で低濃度域が沈み込んでいる部分も示されている。

また濃度分布については、低水路において全般に数値解の方が、下降流の影響がやや大きめに表れている。この原因には実験に用いた粒子の径の不揃いも考えられる。

矩形断面、複断面水路のいずれも、数値解は濃度分布の概略を記述しうると言える。以下にこのモデルを用いて考察を進める。

(2) 従来の研究結果に対する検討

図4、5はいずれもたびたび引用される測定結果で、図

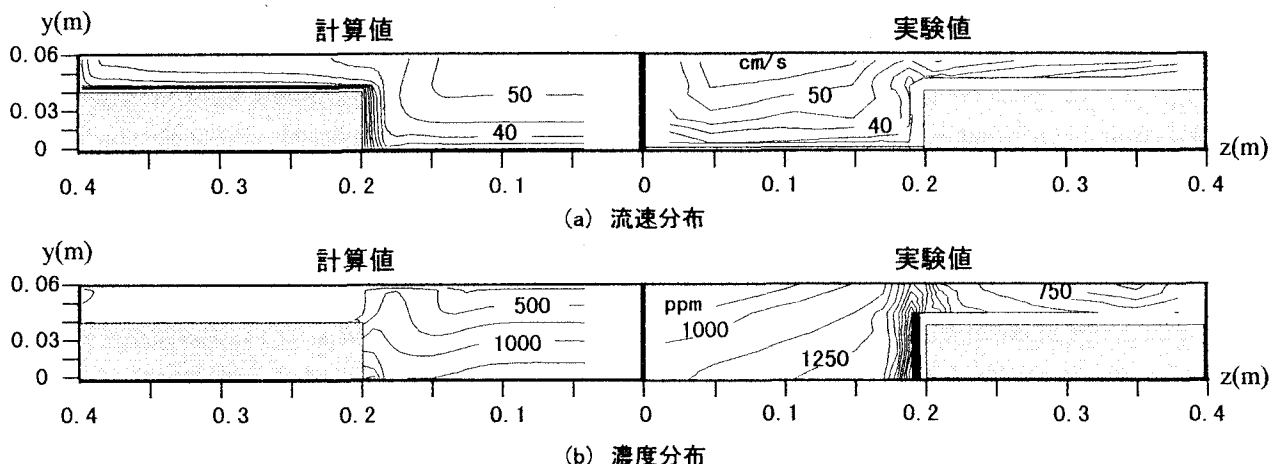


図-3 複断面水路における実験値と計算値の比較

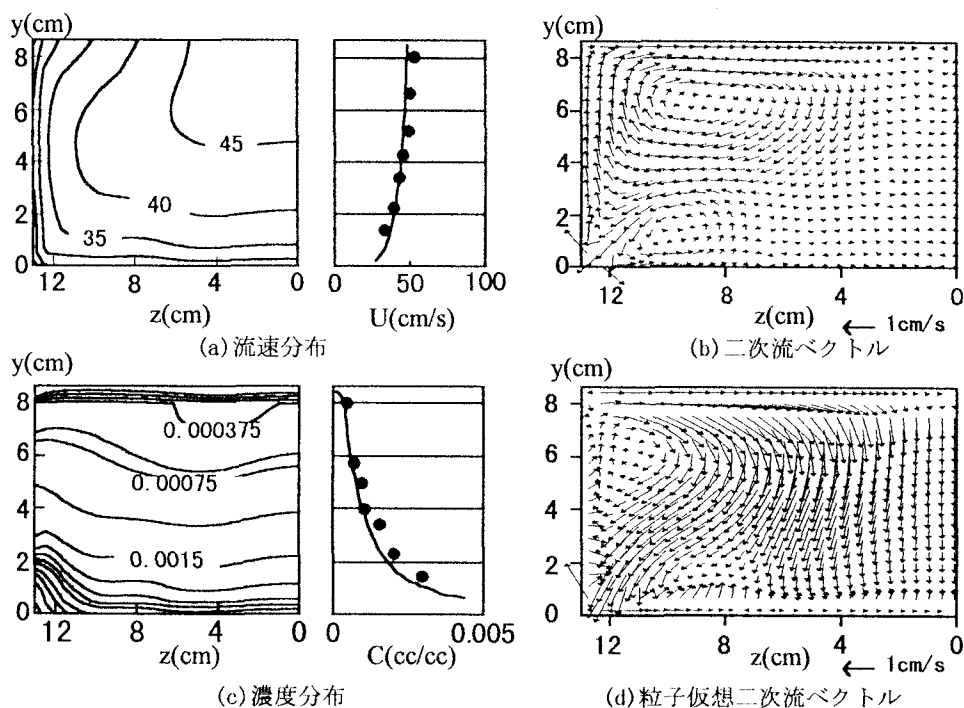


図-4 流速・濃度分布と二次流 (Vanoni and Nomikos Run. 1, 1960)

4の論文 (Vanoni & Nomikos, 1960) は開水路の流速分布と濃度分布の実験値が非常に詳しく記されており、図5の論文 (Coleman, 1981, 1986) には浮遊砂流の流速分布を対数分布とColesのWake functionを用いて表現するときの例として詳しい測定結果が示されている。

いずれも比較的小さい水路での実験であり、原文に与えられている水理条件で水路断面内流況を計算したものである。原文には、水路中心の値のみ示されているので、計算値をこの実測値と比較した。いずれの例でも粒子の挙動に関しては、側壁の影響が水路中央近くまで及んでいることが示されている。またこれらの図から流体運動の二次流的挙動と粒子の挙動との差の程度を知ることができる。

図6は粒子浮遊流の乱れを測定した例から引用したものである (Wang & Qian, 1989)。比較的小さいアスペク

ト比で、しかも急勾配 (1/100) の水路で乱れの測定が行われている。図7は、おそらく世界で最も大きな開水路の実験の例である (Voogt, et al, 1991)。このような大きなスケールの流れでも、これまでに示した矩形断面粒子流の特色は明確に出ていて、側壁近傍での等速度線は鉛直に、等濃度線は水平にという傾向が現れている。また比較的小さいアスペクト比での実験にもかかわらず、いずれの場合も中央部では横断方向の変化が少なく、側壁の影響が水路中央部にまでは達していないことを示している。なお、数値計算に用いた値には原文では特定できないものもあり一部推定で計算を行った。

(3) 複断面水路における粒子濃度分布

図8は複断面水路における濃度分布に及ぼす水深比の影響を調べたものである。高水敷の水深が増すと斜昇流

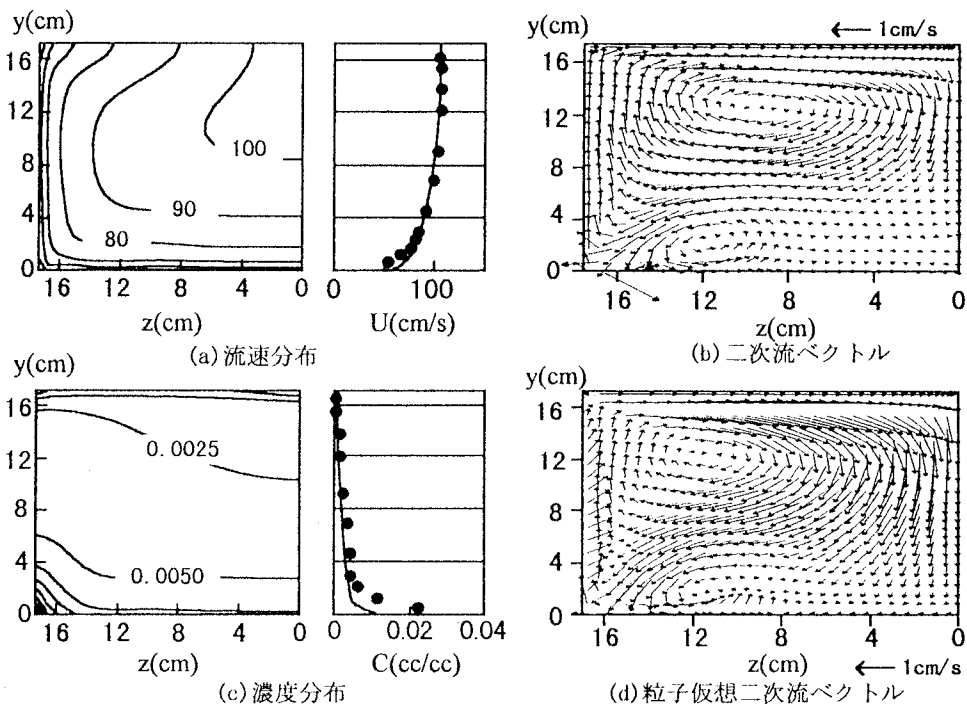


図-5 流速・濃度分布と二次流(Coleman Run.20, 1981)

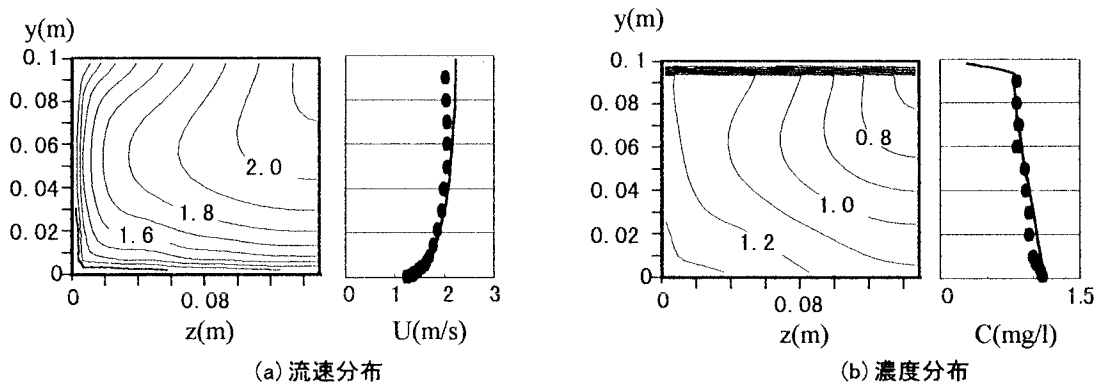


図-6 断面内流速と粒子濃度分布 (Wang, Run.SF3, 1989)

の影響で高水敷側にも反時計回りの二次流が発達し、この作用で境界部に相対的高濃度部(上昇流部)と低濃度部(下降流部)がより顕著になる。逆に高水敷水深が相対的に浅い場合には、高水敷上の平均流速の減少によって粒子懸濁のためのエネルギーも減少して粒子が水路底部近くに集まる傾向がある。

また複断面水路における粒子濃度分布は、斜昇流による循環流でふたつに分断され、この循環流の部分の両側にそれぞれの水深に対応したRouse分布で近似できる部分が見られる。なお水路床への粒子沈降を考慮していない今回の解析では、主水路から高水敷へというような水路横断方向の粒子輸送は現われていない(芦田ら, 1988)。清水中の斜昇流に関しては多くの検討がなされている(例えば瀬津ら, 1993 富永, 1989 杉山, 1995 石垣, 1995)が、上記のように、この現象が粒子濃度分布に対しても最も大きな影響を及ぼす要因になっているといえる。

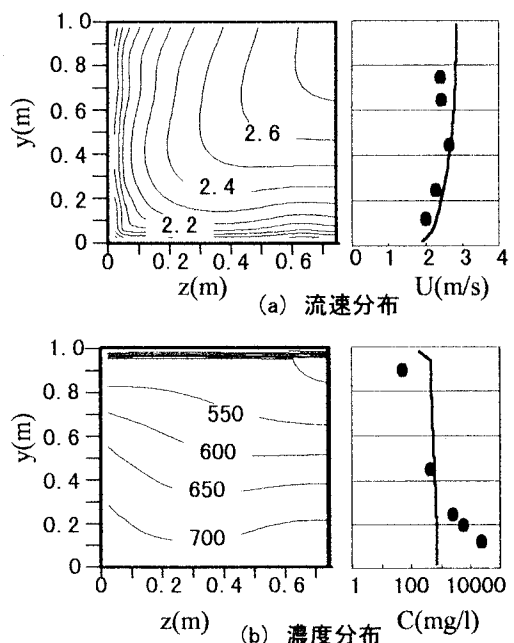


図-7 断面内流速と粒子濃度分布 (Voogt, Run.T6, 1991)

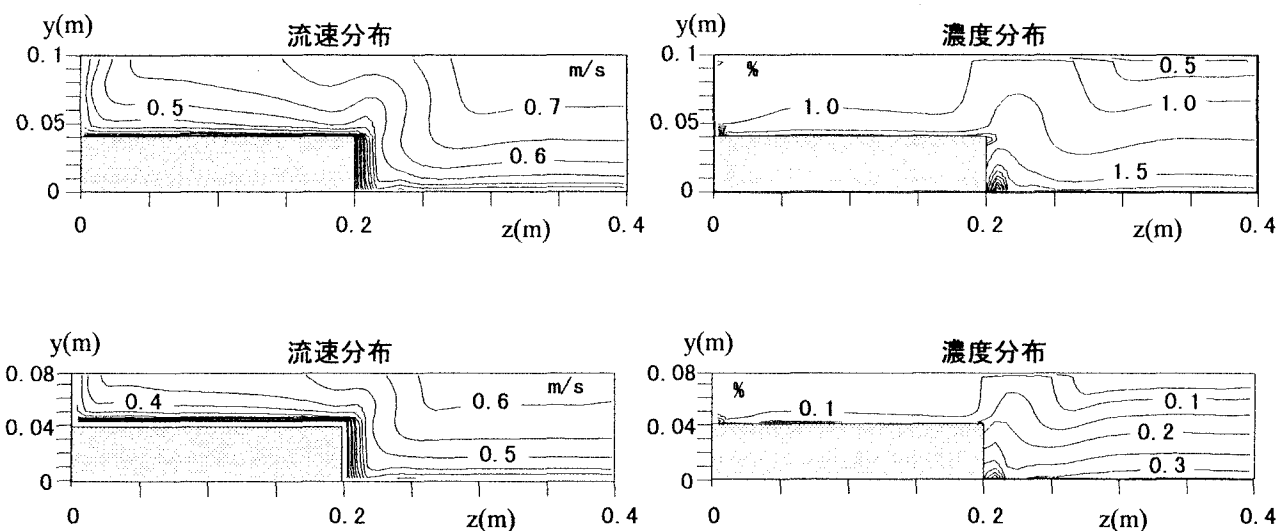


図-8 複断面水路流における相対水深の影響

5. おわりに

開水路側壁により生じる抵抗が水路内の沈降性粒子の濃度分布に及ぼす影響について調べた。流下方向に流れが十分に発達した場合を対象にして、水路内に粒子が保存される場合を検討した。Reynolds stress モデルによる数値解の有効性を室内実験により確かめた後、このモデルを用いて現象の特徴を調べた。得られた主な結果は以下のとおりである。

矩形断面水路では(1)側壁付近での主流速の等値線は側壁に平行に近いが、粒子濃度の等値線はむしろ水平に近い。(2)懸濁粒子は二次流のほかに乱流拡散と沈降の影響を受け、スパイラル運動をしながら流下する。(3)スパイラル運動の中心は粒子沈降の影響を受けて、流体運動の二次流の中心に比べて水路側壁側、水路床側に移動する。(4)側壁の影響は流体運動と同様に、少なくとも水深程度の距離にまで及ぶ。

複断面水路における粒子濃度分布については、(1)低水路側壁部より発生する斜昇流により、境界部に粒子の渦運動領域が生じる。(2)粒子の総量が保存される水路においては、この渦領域の両側にそれぞれの水理条件に対応して粒子濃度分布が形成される。

今回の解析では流速が比較的早く、水路内で粒子は保存される場合を対象にした。現実の水路では、粒子の水路内での沈積や再浮上により、水路内で部分的に粒子の補給や吸収が起こり、水路横断方向の粒子輸送が存在する。今後は、水路底部の境界条件にこのような現象を取り入れて検討を進める予定である。また、流下方向の現象の変化を無視しうる場合を検討したが、複断面水路において高水深が浅い場合には、周期的な水平渦が存在し、粒子の輸送に重要な役割を果たしていることが報告されている(池田ら, 1995 補津ら, 1999)。このような事項についても今後の課題としたい。

謝辞：本研究の実験には本学4年次生の上杉能史君の協力を得た。また、数値計算には一部イギリスラフバラー大学のShiono教授の援助を受けた。ここに記して御礼申し上げる。

参考文献：

- 1) Leo Voogt, Leo C. van Rijn, Jan H. van den Berg : *J.Hydr.Eng.*, Vol.117, No.7, pp.869-890, 1991
- 2) Wang Xingkui, Qian Ning : Vol.115, No.6, pp.781-800, 1989
- 3) Neil L. Coleman : *J.Hydr.Res.*, Vol.19, No.3, pp.211-229, 1981
- 4) B. Lin, K. Shiono : *J.Hydr.Res.*, Vol.33, No.6, pp.773-788, 1995
- 5) 富永、江崎：第32回水理講演会論文集、pp.455-460、1988
- 6) 佐藤ら：土木学会論文集、No.628、pp.115-130、1999
- 7) Dan Naot, Wolfgang Rodi : *J.Hydr.Div.*, Vol.108, No.HY8, pp.948-968, 1982
- 8) 補津ら：水工学論文集、第43巻、pp.335-340、1999
- 9) 芦田ら：第32回水理講演会論文集、pp.461-466、1988
- 10) Neil L. Coleman : *Water Resources Research*, Vol.22, No.10, pp.1377-1384, 1986
- 11) Vito A. Vanoni, George N. Nomikos : *J.Hydr.Div.*, pp.1140-1175, 1960
- 12) Dan Naot, Nezu, Nakagawa : *J.Hydr.Eng.*, Vol.119, No.3, pp.390-408, 1993
- 13) 池田ら：土木学会論文集、No.509、pp.131-142、1995
- 14) 石垣、今本：土木学会論文集、No.515、pp.45-54、1995
- 15) 杉山ら：土木学会論文集、No.515、pp.55-65、1995
- 16) 富永ら：第33回水理講演会論文集、pp.523-528、1989
- 17) 補津ら：水工学論文集、第37巻、pp.575-580、1993

(1999. 9. 30受付)