

貯水池流入部における流れの二次元特性について
On the Character of Two-dimensional Flow at an Inlet Section of Reservoir

早稲田大学 大学院 学生員 古川恵太 K.Furukawa
早稲田大学 理工学部 学生員 市村知也 T.Ichimura
早稲田大学 理工学部 学生員 岡本俊彦 T.Okamoto
早稲田大学 理工学部 正 員 吉川秀夫 H.Kikkawa

1. はじめに

河川又は、水路から貯水池に流入する部分では、境界の急速な三次元的な拡大が存在する。それによって引き起こされる流れの諸現象は、貯水池と流入河川・水路との整合を図る上で、重要な要因となり、これらの現象を把握することは、意義を持つと思われる。本研究では、三次元的に拡大する流入部の流れを、水路床勾配の変化する二次元水路によって、水深の増大する流れで単純化し、そこに発生する局所的な現象について考察した。その結果、流速分布の特異性、組織渦の発生が確認された。

2. 実験概要

実験水路は、長さ 5m 幅 15cm のアクリル製長方形断面開水路を用い、水路内に粗度として径 1.6cm のガラス玉を密に配したベニア板を水路床として組み込み、水深方向に拡大する境界を再現した(図1)。解析用の座標は、水路上流端を始点として水平方向にx軸を取り、鉛直上向きにy軸を取った。水路床勾配は、 $x=190\sim 220\text{cm}$ の間でなめらかに変化させ、この近傍を水路と貯水池の接合部とし、以下 $x<190\text{cm}$ の流れ場に対して上流部、 $x>220\text{cm}$ の流れ場に対して下流部と呼ぶことにする。実験は5つのケースに付いて行い、各ケースの水理条件及び測定器は、表1に示す通りである。測定は、何れも水路中央の断面に対して、 $x=130\sim 310\text{cm}$ の区間について、x方向に 5-30cm、y方向に 0.5-2cm のピッチで行った。又、ケース4に付いては、非定常的な流れの解析を行うため、 $x=220\text{cm}$ 、 $y=2.0\text{cm}$ の点に一成分レーザードップラー流速計をU方向に固定し、二成分ホットフィルム流速計をトラバースして、二点間の同時測定を合わせて行っている。

3. 実験結果

前報【1】において報告した様に、水深の増加する流れにおいては、流速分布の特異性が見いだされる。この流速分布の特異性は、渦度を用いることにより、明確に示すことができる【2】。今回の実験について代表的な渦度分布を示すと、図2、3の様な分布となっている。図2と図3を比較すると、接合部から下流部において、高渦度部の分布に大きな違いが現れている。図2では、接合部近傍に単一の高渦度部のみがあらわれ(以下、単相渦度分布)図3では、接合部近傍の高渦度部より上方に、下流側にのびる高渦度部が存在する(以下、複相渦度分布)。各ケースについての渦度の様相を表1に併記した。これらの渦度分布が、どの様な原因で起こるのかを、以下に検討する。

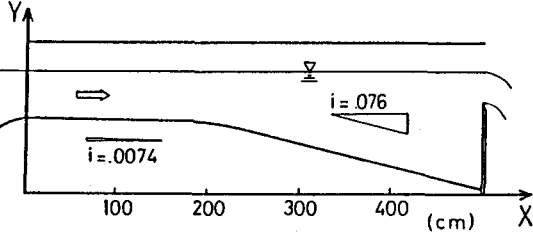


図1：水路概形

表1：水理条件

C a s e	流量 (l/sec)	R e 数 ($\times 10^{-4}$)	F r 数 ($\alpha=190$)	上流	下流	渦度分布	計測器*
1	4.92	3.28	0.41	滑面		单相	L
2	8.33	5.55	0.57	粗面		複相	
3	3.38	2.25	0.28				
4	3.63	2.42	0.23				
5	2.37	1.58	0.20	滑面	粗面		L, H, P P

(*) L:レーザードップラー流速計, H:ホットフィルム流速計, P:プロベラ流速計

3.1 流れ場

渦度分布について考察する際、基礎式として次の式(1)を導入する。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

この式は、二次元Navier-Stokes方程式のRotational Formである。左辺第一項が非定常項、左辺第二・三項が渦度の移流項、右辺が拡散項である。この式形からも明らかなように、この場の内部に於て、渦度が生成されることはない。単相の渦度分布も複相の渦度分布も境界からの移流・拡散により発生していると考えられる。先ず第一に、移流項に着目し考察する。単相の渦度分布は、ケース1に現れているのみであるが、底面が滑面のためにポテンシャル流に近い流れ場となり、強い下降流が存在し(図4)、上流部からの移流により、このような分布が現れていると予想される。一方、複相の渦度分布が現れる流れにおいては、接合部から下流側で減速域が広がり、下降流の強さが緩和されている(図5)。その結果、流れが境界の拡大に追従せず、複相の渦度分布が生じていると考えられる。このことは、接合部で粗面としたケース5において、強い複相の渦度分布が生じていることから、裏付けられる。次に拡散項の寄与を考えるため、ケース4の接合部から下流部にかけてのReynolds Stress分布を図6に示す。この図より、平均流への拡散項の影響は底面近傍に限られ、複相の渦度分布への影響は小さいと考えられる。しかし、絶対値は小さいながらも、底面から水面に向かうピークの尾根が存在することが判る。この方向は平均流による移流方向ではなく、急速に上方に向かっている。この方向に対する拡散が、複相の渦度分布の高渦度部を変位させていることも考えられるので、この点について以下に検討する。

3.2 組織渦

平均流では、このように底面から急速に上方に向かう流れが存在しないので、非定常的な現象が関係していると考えられる。ここで、式(2)により定義される時空間相関係数を指標として、 $\tau = 0, 0.5, 1.0, 2.0 \text{ sec}$ について示したのが、図7である。

$$C_\tau = \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{U'_L(t) U'_M(t+\tau)}{\sqrt{U_L'^2} \sqrt{U_M'^2}} dt \quad (2)$$

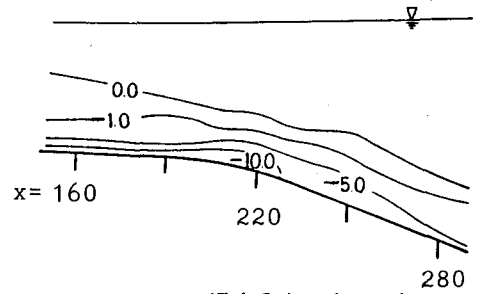


図2: Case 1 渦度分布 (1/sec)

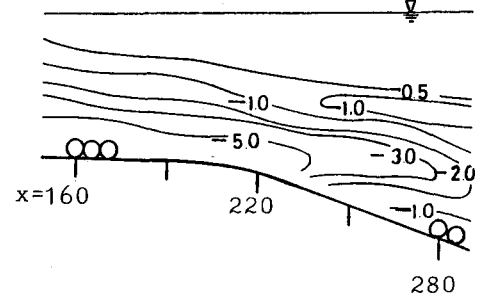


図3: Case 3 渦度分布 (1/sec)

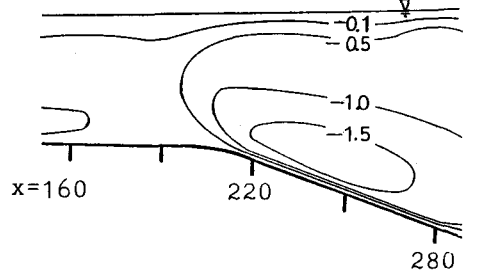


図4: Case 1 V分布 (cm/sec)

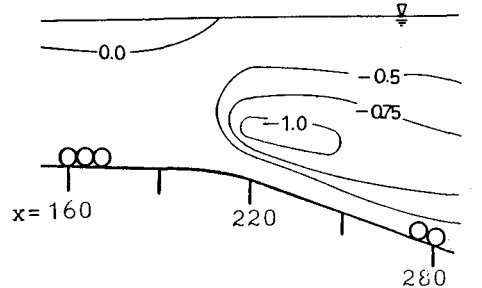


図5: Case 3 V分布 (cm/sec)

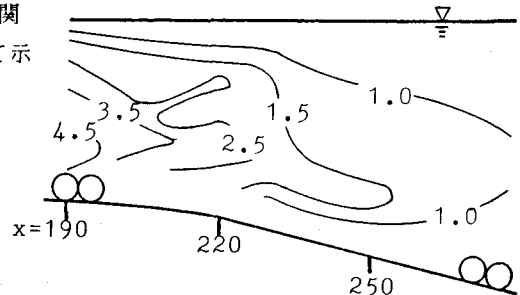


図6: Reynolds Stress 分布 (dyn/cm²)

(ただし $U' : x=220, y=2.0$ における流速の変動分 , τ : おくれ時間 , $U_H' : \text{各点における流速の変動分}$, $T - T_0 : \text{計測時間}$, $- : \text{計測時間に対する平均値}$)

相関係数の値は一般に低い値を示しているが、この図より、移流方向に分布する相関が現れていることが判る。また、渦度が底面から急速に立ち上がる領域では、底面と遅れ時間ごとに変化する相関が見られ、この現象が底面からの非定常的な運動により、引き起こされていることが予想される。いま、仮にこの運動を組織渦と呼ぶことにする。しかし、計測時間全体を解析の対象とした相関係数による方法では、組織渦が発生していない時間における相関も含むため、明確な知見が得られない。そこで、レーザードップラー流速計の信号より、式(3)に示すVITA法を用いて【3】、トリガ信号 $I(t)$ を作り、 $I(t)=1$ の時間を中心に流速変動の集合平均を取って組織渦を追跡した。

$$\begin{cases} I(t) = 1 & \text{if } \text{Var}(t, T) > k \overline{U'^2} \\ I(t) = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \begin{cases} \text{Var}(t, T) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{1}{T}}^{t+\frac{1}{T}} U'^2(t) dt - \left(\frac{1}{T} \int_{t-\frac{1}{T}}^{t+\frac{1}{T}} U'(t) dt \right)^2 \\ T = 0.2 \text{ sec} , k = 1 \end{cases} \quad (3)$$

集合平均された波形の一例を図8に示す。明確な渦の構造等を示すことは出来ないが、図中aで示すような相似の波形を各断面で追跡することによって、組織的な運動の軌跡を示すことが可能と思われる。この方法により読み取った軌跡を示したものが、図9である。

この図より、底面から急速に上昇する組織渦の軌跡が示されている。そして、トリガ信号は、およそ1 Hzで検出され、その運動の幅が1 sec 近くあることより、これらの組織渦が平均流に影響を与えるのに十分な運動であることが、予想される。そこでは、これらの組織渦により引き起こされる乱れによって、平均流のエネルギーが消費されていると考えられ、乱れのエネルギーの発生項である $\rho u'v' (du/dy)$ を計算すると図10のようになり、この図中に見られるa-eのピークが現れる。これを連結した線を図9に破線で示すと、組織渦の軌跡とよく一致することが判る。このことから、組織渦の存在が裏付けられ、複相の渦度分布を上方にシフトさせる原因となり得ると考えられる。

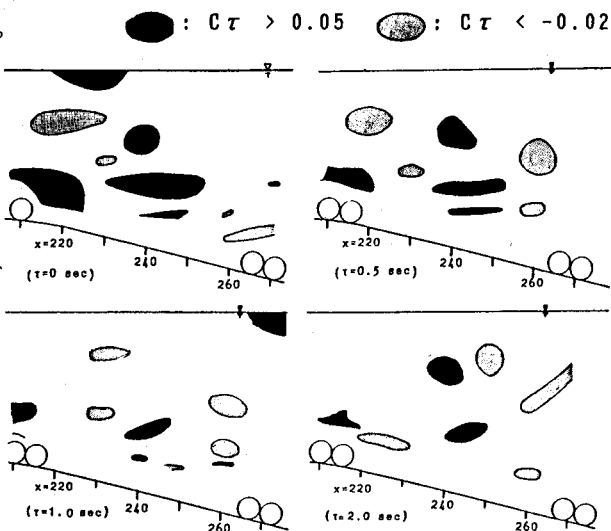


図7：時空間相関係数

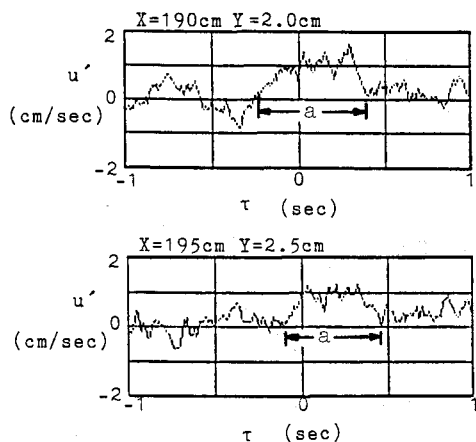


図8：条件付きサンプリング例

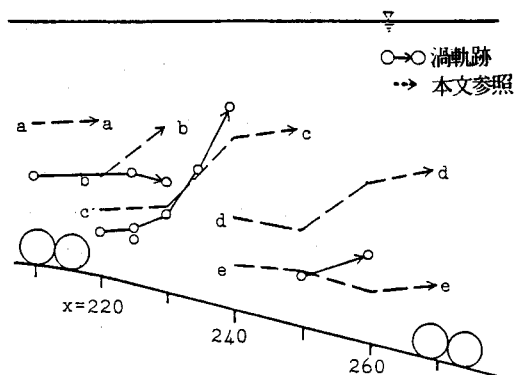


図9：組織渦軌跡

3.3 流れのシミュレーション

以上の考察により、複相の渦度分布は、頻繁に起こる非定常的な流れの影響を受けているものの、大部分は、平均流による移流、拡散で現象が決定されているといえる。そのことを、明らかにするため、式(1)で導入した Navier-Stokes 方程式の定常解の数値解を求め、流れをシミュレートすることを試みる。現在、Navier-Stokes 方程式の数値解については、スーパーコンピュータを用いた種々の計算により、三次元的な渦の構造まで導かれ、実験の精度を上回る結果も報告されているが(例えば【4, 5】)、今回の計算は、流れの傾向を知ることが第一の目的であるため、ごく簡単な方法でシミュレートした。対象とする式は、式(1)より非定常項を除いた式と、連続式として流れ関数 ψ を導入した式(4)であり、境界点をすべて格子点とする不等間隔のメッシュに対して中心差分で離散化して、緩和法により解を求めた。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega \quad (4)$$

(ただし ψ : 流れ関数, $d\psi/dy = U$, $d\psi/du = -V$)

境界条件は、次のように定めた。

- (a) 流路形状 : 水面形は、実測値の平均を用い水平とする。水路床は、仮想底面におく。
- (b) 流れ関数 : 水面において $\psi = 0$ 、水路床においては、流量に対応する一定値とする。
- (c) 渦度 : 水面において $\omega = 0$ 、水路床では、底面渦度分布を仮定する。
- (d) 上下流端流速: ペキ乗則を仮定し、対応する流れ関数を与える。
- (e) 拡散係数 : 全断面で一定値を与える。

ここで、(c)の底面渦度に関しては、若干の検討が必要と思われる。まず実測の渦度分布より、その分布形を求めるが、直接渦度を読み取ることは困難であるので、Navier-Stokes 方程式の x 軸方向に対する式を、底面から水面まで積分して得られる式(5)を用いて、底面上の渦度を求めた。

$$v\omega_0 = -\int_0^h v\omega \, dy + \int_0^h \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{q^2}{2} + P \right\} dy \quad (5)$$

(ただし ω_0 : 底面渦度, P : 圧力, h : 水深, $q^2 = u^2 + v^2$)

ケース1~4について底面渦度を求め、その最大値 $\omega_{0\max}$ と拡散係数 ν を掛けたもので無次元化された分布を示すと、図11のように、一定の分布形が得られる。この分布形をもとに、底面渦度の移流、拡散の条件を表(2)の様に設定し、ケース3に対応する計算を行った。渦度に付いての計算結果を図12に示す。各計算の意義と結果の評価をつぎに列挙する。

SR1・複相の渦度分布が再現され、ほぼ実測値を満足した結果が得られている。この渦度分布形を、以下のケースの評価の基準とする。

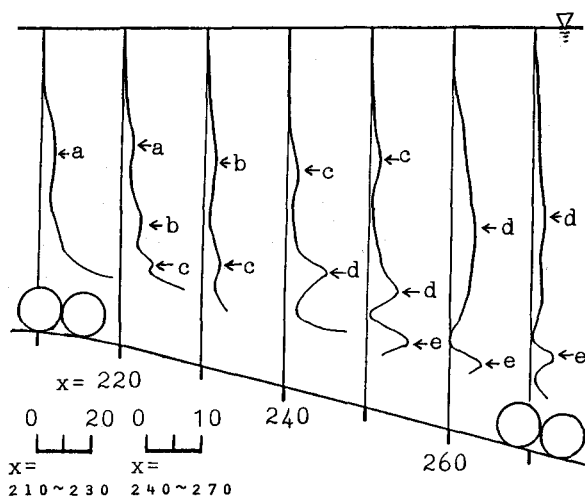


図10: 乱れエネルギー生成項 (dyn/cm・sec)

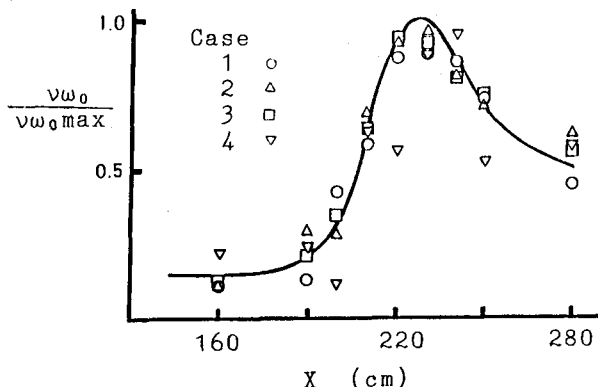


図11: 無次元底面渦度分布形

SR2 ・底面からの移流も拡散も起こらないように境界条件を設定する。具体的には、底面渦度をなくすことにより計算を行った。したがって、結果として現れている渦度は、全て上流端の流速分布の持つ渦度が移流されることによって供給されている。このケースでは、複相の渦度分布の上方に現れる高渦度部のみが再現され、この領域における渦度が移流により生成されていることが判る。

表 2 : 計算条件

ケース	底面からの移流	底面からの拡散	流れ場の拡散係数	最大底面渦度
SR 1	あり	あり	2	-3.5 (1/sec)
SR 2	なし	なし		
SR 3	なし	あり		
SR 4	あり	あり	10	

SR3 ・底面においては、付着の条件により流速がないと考えられるので、底面渦度が存在しても移流されず、その渦度は拡散のみに影響するとして計算を行った。結果は、SR1と同等の渦度分布が再現され、底面近傍では拡散の影響が強いことを確認できた。

SR4 ・流れ場の拡散係数を大きくすることにより、相対的に移流の効果を少なくし、流れ場における移流の効果について評価する。渦度は、単相の渦度分布に近い状況を示すが、本質的には異なるものと思われる。単相の渦度分布では、移流方向が底面に沿うことにより、上方の高渦度部が存在しなかったが、このケースの場合、移流分そのものが小さいために、複相の渦度分布における上方の高渦度部が生じなかったと考えるべきである。この結果は、SR2、3の評価の裏付けとなる。

これらの結果は、実測の底面渦度を用いていることにより、厳密な意味での定常解ではないが、時間平均としての流れ場の解とするならば、安易な計算法として、有効であると思われる。

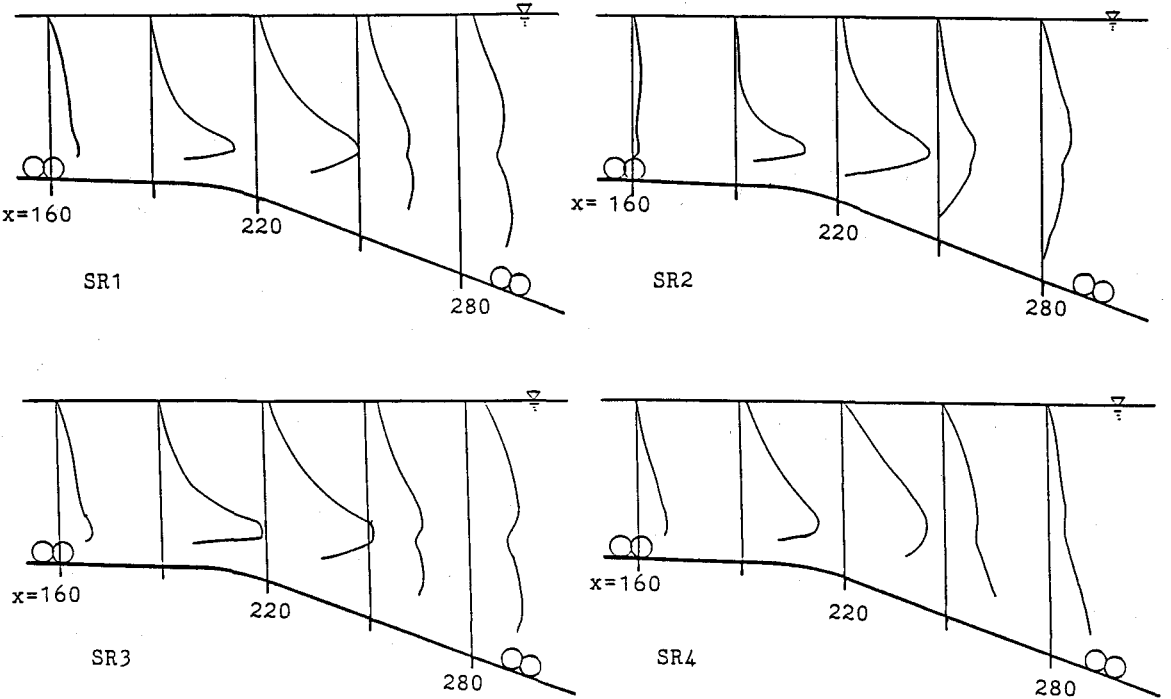


図 12 : 計算結果 (渦度単位 |—| : -5(1/sec))

4. おわりに

本研究で得られた主要な結論をまとめると、以下の2点が挙げられる。

(1) 流れの拡大による流れを、単相と複相の渦度分布に分けて評価し、複相の渦度分布をもつ流れにおける移流、拡散の影響を、数値計算により明らかにした。

(2) 流れの非定常的な挙動に着目し、組織渦の軌跡を示し、平均流のエネルギーの逸散が起こっていることを示した。

しかし、(1)については、単相と複相の渦度分布の発生条件を定性的に示すパラメーターの設定、二つの現象の本質的な違いが明らかにされておらず、更に検討していく必要があると思われる。また、数値計算に対して与えた拡散係数、底面渦度分布に対する理論的根拠がなく、検討の余地が残されている。(2)については、組織渦と言い切るには、検証が不十分であると思われる。しかし、この現象が底面より上昇する運動であることは示すことが出来た。このことは、流砂等の問題において、上昇流の存在が流砂量に与える影響が小さくないことを考えると、この現象を更に詳しく調べるのが、意義あることと思われる。そのためには、組織渦をとらえるトリガ用の信号の選択、計測法について、再考する必要がある、今後の研究課題として残されている。

参 考 文 献

- 【1】 非一様勾配水路における境界層の発達に関する研究, 古川、萩原、吉川、関根ら
第31回水理講演会論文集 pp.407-412 (1987)
- 【2】 非一様勾配開水路における流れの研究, 古川、萩原、吉川ら
土木学会年次講演会概要集 pp.408-409 (1987)
- 【3】 ON THE STRUCTURE OF TURBULENT BOUNDARY LAYERS, Hassan M.Nagib, Yann G.Guezennecら
10-th Symposium on Turbulence pp 1.1-15 (1986)
- 【4】 The structure of the vorticity field in turbulent channel flow, J.Kim, P.Moinら
J.F.M Vol 162 pp.339-363 (1986)
- 【5】 Direct numerical simulations of chemically reacting turbulent mixing layers,
J.J.Riley R.W.Metcalf, S.A.Orszagら
Phys.Fluids Vol 29(2) pp406-422 (1986)