

貯水池内に流入する浮力水塊の挙動解析 *Analysis on Buoyancy Inflow Behaviors in Reservoir*

道奥康治*・藤川佳宏**・不二秀人***

By Kohji MICHIOKU, Yoshihiro Fujikawa and Hideto Fuji

Dynamics of river inflow into a stratified reservoir is discussed by performing a $k-\epsilon$ turbulence model analysis. Several types of density currents found in a stratified reservoir are numerically reproduced; (1) plunging inflow at the upstream end of a reservoir, (2) surface density current taking place when fluid density of inflow is smaller than the reservoir water, (3) density undercurrents in the case of inflow density being larger than that of the reservoir water, (4) interaction between a thermocline and the inflow water mass, etc.. It is confirmed that every types of the flows are successfully reproduced by the $k-\epsilon$ turbulence model. Some of the results are compared with the previous laboratory experiments and satisfactory agreements between the analysis and the experiments are obtained. The authors believe that some turbulence model should be taken into consideration in modelling reservoir hydrodynamics, which would be powerful tool in predicting reservoir water quality.

Keyword: stratified reservoir, density flows, $k-\epsilon$ model, gravity under currents, stratified shear flows.

1. はしがき

貯水池の水質予測モデルの多くでは、平均流の移流効果に重点が置かれている。明確な保存則に従う水温のような物理量を月～季節変化単位で予測する場合には、従来のモデルが十分の予測精度を発揮するが、以下のような流況では従来型の貯水池モデルの性能に限界が生ずる。

- 1) 平均移流に比べて乱流輸送が支配的な場合－循環期のように熱対流乱流が支配的である、出水期のように乱流拡散が卓越する、交換率が低く平均流の効果が小さい、などの場合がこれに相当する。
- 2) 水質指標のうち生物・化学過程により支配され、かつ物質収支則が十分に確立されていないような項目を予測対象とする場合。

1) の問題は、乱流項の記述が経験的であることに起因し、数値計算上の工夫だけで予測精度を改善することには限界がある。乱流理論の導入など水理学的な改善を貯水池モデルに施す必要がある。2) の問題は、現地観測を積み重ねて多数項目の水質指標相互の連鎖関係を明らかにし、各種の物質収支則を確立しなければならない。本研究では、1) の問題に対する貯水池モデルの改善策として $k-\epsilon$ モデルの適用を考える。対象とする現象はこれまで実験的に多く検討されてきた貯水池内への流入密度流である。水理実験では濃度・流速の多点同時計測は困難であったが、乱流モデルにより流動・密度構造の経時的な追跡が可能となる。

* 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)

** 学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻

*** 正会員 工修 (株)清水建設

2. 対象とする貯水池モデル

2.1 座標系と境界条件

図-1に示す一定の水路床勾配 I を有する二次元貯水池模型を対象とする。貯水池内の上層・下層は各々一様の浮力 $B=0$, $B=B_0$, を有している。上流端からは浮力 B_0 の水が単位幅流量 q_0 で流入する。下流端では躍層高さにオリフィスゲートが設置され、流入流量と同じ割合で放流される。貯水池長は L , 上下層水深が各々 (h_1, h_2) とする。上流端では対数則に従う開水路乱流として流速分布を与え、密度は一様とする。水面は Rigid-lid, 固定境界で流速は 0 である。

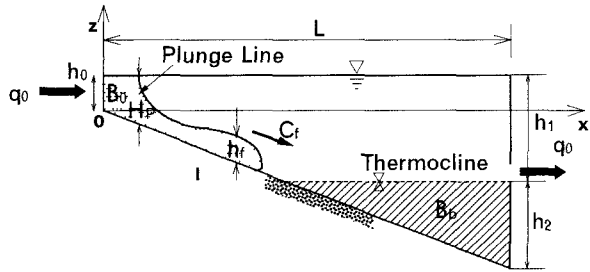


図-1 二次元貯水池モデルの模式図

表-1 貯水池流入密度流の分類

$R_{i0} < 0$		(a) surface flow
$R_{i0} > 0$	$\tilde{B}_b > 1.0$	(b) horizontal intrusion along the thermocline
	$\tilde{B}_b \ll 1.0$	(c) bifurcation or (d) underflow

(1) 代表物理量

- * 長さ: $L_0=h_0$ (上流端の水深),
- * 速度: $U_0=q_0/h_0$ (上流端での断面平均流速), * 時間: $t_0=L_0/U_0=h_0^2/q_0$, * 浮力: $|B_0|$.

(2) 無次元量の定義

- * 座標: $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{t})=(x/h_0, y/h_0, z/h_0, q_0 t/h_0^2)$, * 平均流速: $(\tilde{u}, \tilde{v})=(u, v)h_0/q_0$, * 浮力: $\tilde{B}=B/|B_0|$,
- * 乱れ強度と TKE: $(\tilde{u}^2, \tilde{v}^2, \tilde{k})=(u^2, v^2, k) \cdot (h_0/q_0)^2$, * TKE の散逸率: $\tilde{\epsilon}=\epsilon \cdot (h_0^4/q_0^3)$.

(3) 無次元パラメーター

(2) の無次元化に基き、基礎方程式と初期・境界条件から以下の無次元支配パラメーターが導出される。

- * 流入点での Richardson number: $R_{i0}=B_0 h_0^3/q_0^2$, * Reynolds number: $Re_0=q_0/\nu$, * 貯水池長: $\tilde{L}=L/h_0$,
- * 上下層浮力差: $\tilde{B}_b=B_b/B_0$, * 上下層水深と貯水池長: $(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \tilde{L})=(h_1, h_2, L)/h_0$, * 河床勾配: I .

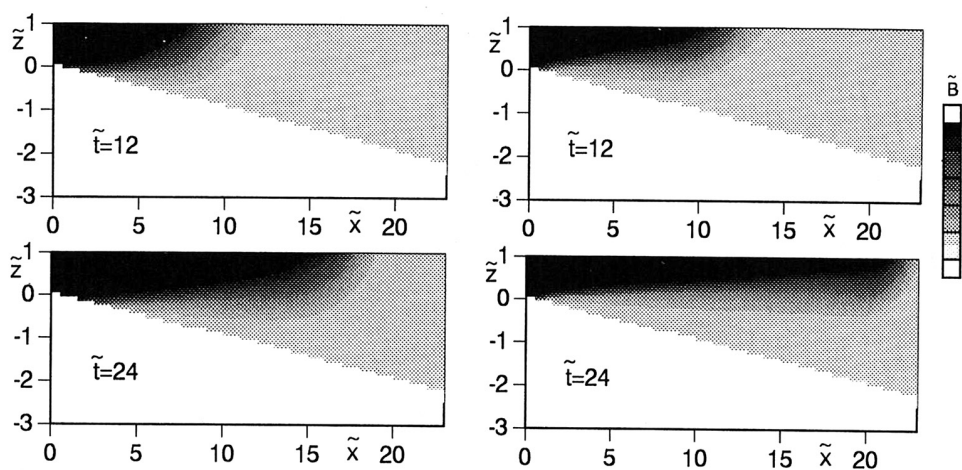
2.3 解析条件

潜り込み密度流ならびに密度流先端部の流動機構に関する福岡らの一連の実験的研究^{1), 2)}との比較を目的として、幾何学的条件は、 $I=1/10$, $(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2)=(1.7, 1.7)$, $\tilde{L}=23$, $Re_0=500$, とする。

$(R_{i0}, \tilde{B}_b)$ の組み合わせにより、貯水池密度流の形態はおおよそ表-1のように分類される。本論では、同表中の各種流動形態があらわれるようにパラメーター R_{i0} , $\tilde{B}_b$ を設定して解析を行い流動構造を考察する。

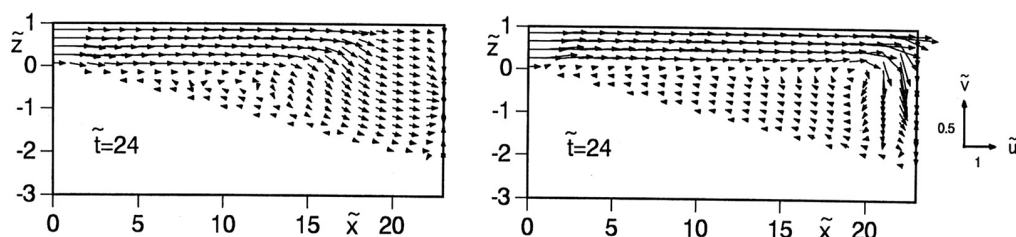
3. 表層密度流 ($R_{i0} < 0$ の場合; $\tilde{B}_b=0$)

表層密度流の例として $R_{i0}=-1.0, -3.0$ の場合の解析結果を示す。図-2は基準化された浮力 $\tilde{B}$ の分布を、図-3はこれに対応する流速ベクトルを表す。上流端より開水路流として流入した水塊はその浮力によりある点で池底を離れ、図-2.3のような表層密度流を形成する。種々の実験研究で確認されたように先端部でやや膨らみを持つ密度フロント特有の貫入形態を示す。流速場に関して水理実験では断面での計測しかできなかったのに対し、乱流モデルは流動構造全体を再現できる。図-4は乱流エネルギー $\tilde{k}$ の空間分布である。流入塊が池底を離れる付近で大きな乱れが生成されている。



(a) $R_{i0} = -1.0$ の場合 (b) $R_{i0} = -3.0$ の場合

図-2 表層密度流における浮力 $\tilde{B}$ の分布の時間変化



(a) $R_{i0} = -1.0$ の場合

(b) $R_{i0} = -3.0$ の場合

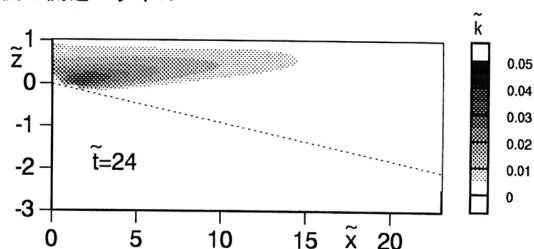
図-3 表層密度流の流速ベクトル

4. 下層密度流 ($R_{i0} > 0$ の場合; $\tilde{B}_0 = 0$)

4.1 流動・浮力場の構造

流入水塊の密度が貯水池水のそれより大きい場合には潜入点 (Plunge point, 図-1参照) で下層へ潜り込んで複雑な局所流を形成し、その後壁面に沿って下層密度流を形成する。

図-4 表層密度流の乱流エネルギー $\tilde{k}$ の分布 ($R_{i0} = -1.0$)



下層密度流特性におよぼす R_{i0} の影響をみるた

めに $R_{i0} = 0.5, 2.0$ の場合の密度分布, 流速ベクトルを図-5, 6に例示する. 潜入点付近に着目すると, 流入塊による貯水池水の連行加入, 潜入点の水表面における流れの収斂, 開水路流から密度流に移移する過程での局所流構造など, これまでに他の研究者により実験的に観察されてきた流れの流動特性が本解析により定性的に記述されている. また, 密度フロントが膨らんでその周辺に大きな循環流をとまう密度下層流特有の流動形態が確認される. Richardson 数が相対的に大きな $R_{i0} = 2.0$ の場合のフロントの伝播速度は $R_{i0} = 0.5$ の場合に比べて大きく, フロント後続部の流速も大きい. 図-7には無次元時間 $\tilde{t} = 32$ における両ケースの無次元乱流エネルギー $\tilde{k}$ の空間分布を示す. せん断力が大きい壁面近傍や密度フロント部では $\tilde{k}$ が大きく, 上流ほど $\tilde{k}$ は小さい. 特に, フロントの中心部では大きな乱流エネルギーがあらわれている. $R_{i0} = 2.0$ の場合, 浮力によって流れがより強く駆動されるため $R_{i0} = 0.5$ の場合より大きな $\tilde{k}$ を有している.

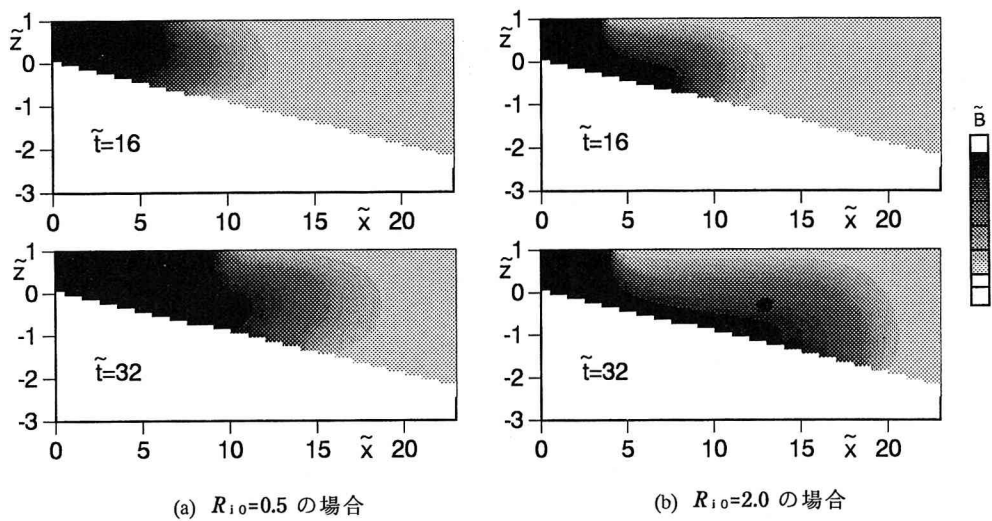


図-5 下層密度流における浮力 $\tilde{B}$ の分布の時間変化

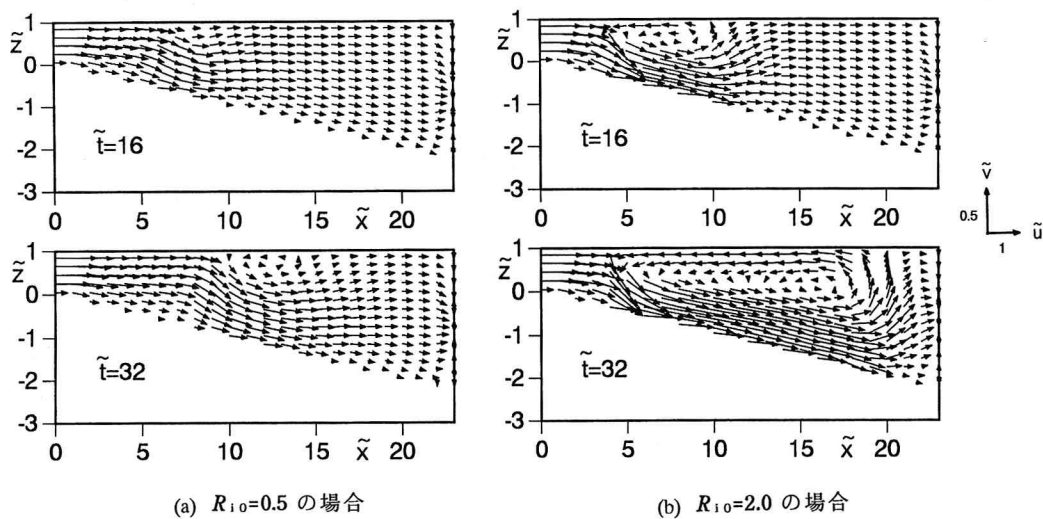


図-6 下層密度流の流速ベクトル

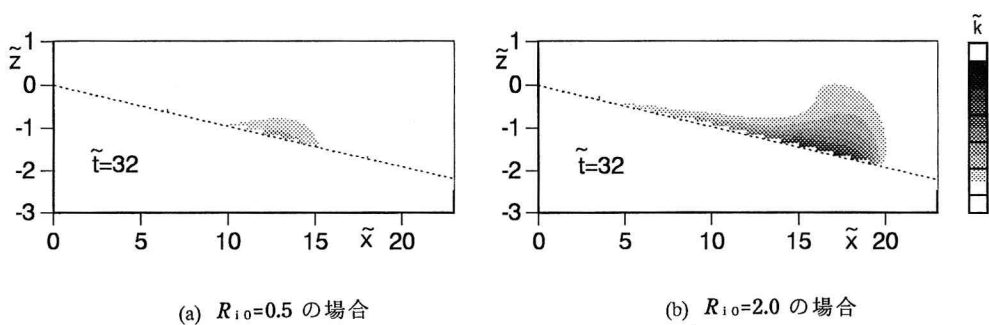


図-7 下層密度流の乱流エネルギー $\tilde{k}$ の分布

4.2 潜入点水深: H_P

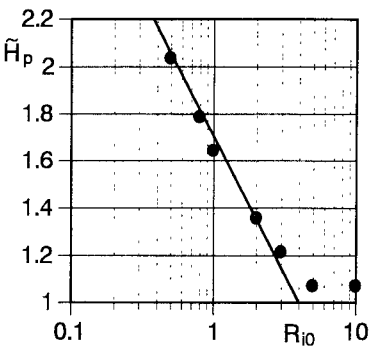
潜り込み点の水深 H_P について福岡ら¹⁾は急変流の圧力・流速分布に関する補正を加えた一次元運動量保存則に基づき式(1)のような理論解を得た。

$$H_P/H_C=4^{1/3} \tag{1}$$

ここで、 $H_C=(q_0^2/B_0)^{1/3}$ は限界水深である。これを本論の定義による無次元潜入点水深 $\tilde{H}_P=H_P/h_0$ と流入 Richardson 数 $R_{1,0}$ との関係に書き直せば、次式を得る。

$$\tilde{H}_P=(4/R_{1,0})^{1/3} \tag{2}$$

本解析より得られた $\tilde{H}_P$ と $R_{1,0}$ の関係を式(2)とともに図-



8に示す。 $\tilde{H}_P$ は時間的にほとんど変動しない。

図-8 潜入点水深 $\tilde{H}_P$ と Richardson 数 $R_{1,0}$ の関係

$R_{1,0}$ の小さな範囲内では、 $\tilde{H}_P$ は $R_{1,0}$ の減少関数であり、図中の曲線で示された式(2)とほぼ一致している。しかし、 $R_{1,0}$ が増加するにつれ本解析解は $\tilde{H}_P \rightarrow 1$ に漸近する。式(2)からわかるように上流境界で開水路流であるためには $\tilde{H}_P \geq 1.0$ ，すなわち $R_{1,0} < 4$ でなければならない。 $R_{1,0} > 4$ の場合には本解析領域の上流端境界よりさらに上流に潜入点が存在すると考えられるため、上流端においては下層密度流としての境界条件を与えなければならない。

4.3 密度フロントの伝播特性

流入水塊は壁面摩擦・フロントに作用する抗力・密度界面での内部摩擦力などの各種抵抗力を受ける一方、上流から重い水が供給されるためフロントの体積は時間とともに増加する。図-9には本解析から得られた密度フロントの無次元最大厚さ $\tilde{h}_{max}=h_{max}/h_0$ の経時変化を示す。福岡らの実験²⁾における上流端水深が不明であったので本解析値との直接的な比較をすることはできなかったが、実験で確認されたように、フロント厚さが伝播とともに増加するという密度フロントの特性は解析でも確認される。また、本解析での無次元化に基づけば、フロント厚さの増加傾向は $R_{1,0}$ には依存せずケース間でほぼ相似になることが明らかになった。

フロントの無次元伝播速度 $\tilde{C}_f=C_f h_0/q_0$ (C_f は伝播速度)の経時変化を図-10に示す。 $R_{1,0}$ が大きいほど浮力の流下方向駆動力が大きくフロントの伝播が速くなる傾向があらわれている。福岡らの積分モデルによる解析²⁾では流下ともに伝播速度がやや増大する傾向が見られたが、本解析ではむしろ伝播速度がやや減少

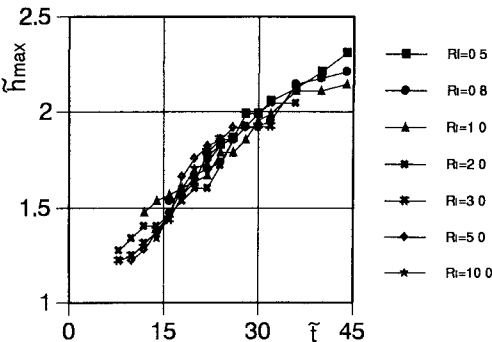


図-9 下層密度流におけるフロントの最大厚さの経時変化

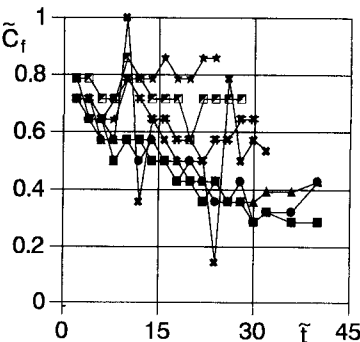


図-10 下層密度流におけるフロントの伝播速度の経時変化

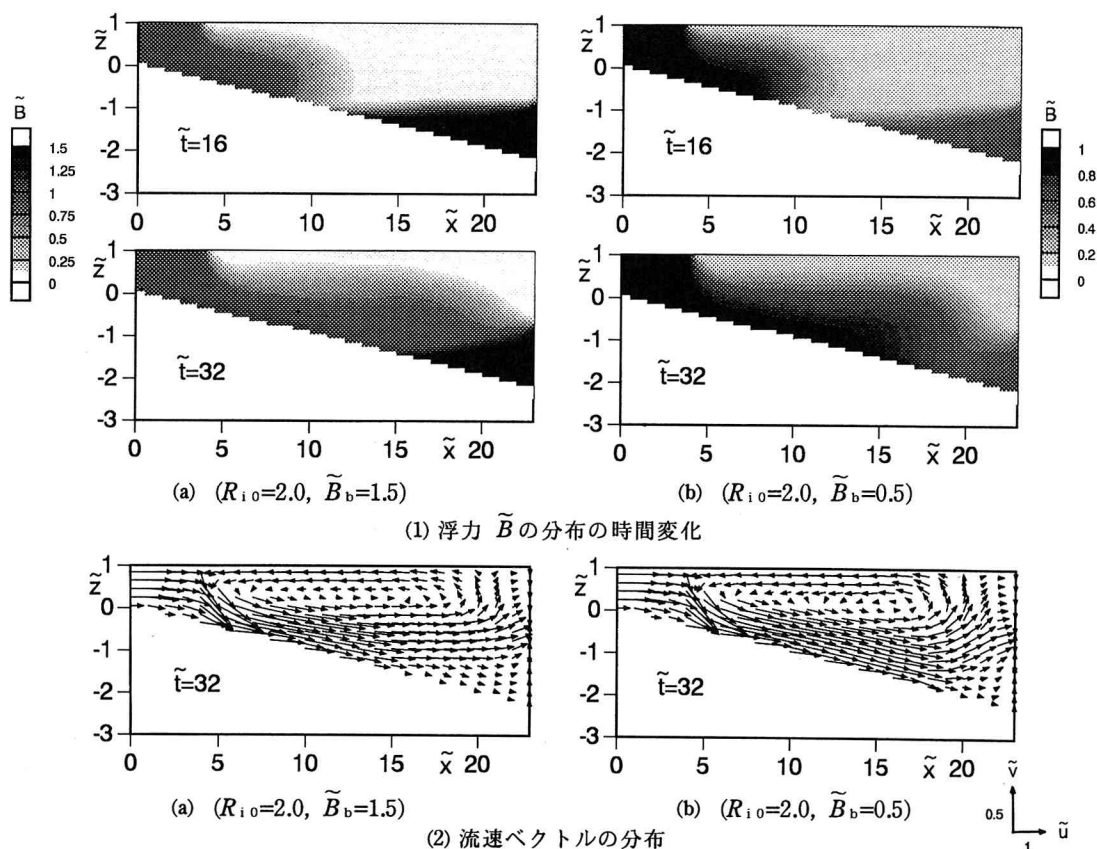


図-11 流入浮力水塊と躍層との相互作用

するようである。これは希釈混合によってフロント水塊の相対重力が減少するためであると推察される。

5. 躍層と流入水塊の相互干渉

躍層が存在する場合には、貯水池内に流入した浮力水塊と躍層が相互に干渉して上下層間の水質混合を誘起し、表-1に示すように、(b) 躍層に沿った水平貫入、(b) 中層・下層密度流への分岐、(c) 下層流の再形成、など、様々な流動形態を生ずる。このような例として (a) $R_{10}=2.0, \tilde{B}_b=1.5$ と (b) $R_{10}=2.0, \tilde{B}_b=0.5$ の場合の解析例を図-11に示している。明確な分岐密度流が今回の解析では再現されなかったが、(a) の場合は水平貫入が、(b) の場合には下層流が形成されている。

6. むすび

種々の水理条件のもとで貯水池密度流の各種流動形態が k - ϵ 乱流モデルによって再現された。特に、密度フロントの発達・伝播特性、潜入点での局所密度流特性が乱流モデルにより記述できた。平均流に比べて乱流効果が卓越するような水理条件下では水質輸送過程の再現に乱流モデルを導入することが必要となる。今後、流入にともなう連行加入量、躍層部での分岐特性、など水質混合に関する乱流モデルの定量的検証を行わなければならない。さらに、様々な地形・水文条件下で適用が可能で、かつ乱流過程を取り入れた三次元解析モデルを開発することにより貯水池水質の予測精度を向上させる必要がある。

参考文献

- 1) 福岡・福嶋・中村：二次元貯水池密度流の潜り込み水深と界面形状，土木学会論文報告集，第 302 号，pp.56-65，1980 年
- 2) 福岡・水村・加納：密度流先端部の流動機構に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 274 号，pp.41-55，1978 年