

# 網走川における塩水調整ゲート周辺での塩水流入機構の解明

## Study on the mechanisms of density current migration around a hydraulic structure on Abashiri River

赤堀良介<sup>1</sup>

Ryosuke Akahori

<sup>1</sup> 東京工業大学 大学院理工学研究科 助教

### 要 旨

網走湖は北海道東部に位置する成層化した汽水湖である。オホーツク海からの塩水の流入のために下層が塩水となっているが、これが無酸素化することで青潮などの被害が生じている。対策にあたっては、網走湖とオホーツク海を接続する網走川において塩水遡上を抑制する堰の設置等が考えられる。このような構造物の評価をするにあたり、近年は環境への影響を詳細に検討する必要があることから、高精度の3次元数値計算が有効であると考えられる。本研究では、LESモデルを基礎とした、単純かつ実用的な3次元密度流数値計算コードを作成し、それをを用いて堰周辺での密度フロントの流入機構を詳細に検討することで、構造物設置による塩水遡上抑制に対しての新たな知見を得ることを目的とした。

**Key Words** : 《密度流, Large Eddy Simulation, 網走湖》

### 1. はじめに

網走湖は北海道東部、網走川河口部に位置し、オホーツク海へと接続している二成層湖である。上層水は淡水であるが、湖水面と海面との水位差が小さいために大潮時などに海水の湖内への流入が生じることから、下層は塩水化している。同時に、流入河川の水質悪化により湖内は富栄養化状態となっており、下層の塩水はほぼ無酸素化している。このような状況から、網走湖では強風時に下層の無酸素状態の塩水が湧昇し、青潮の発生が問題化している。

問題の解決に当たっては、塩淡水境界層の降下を促すことが非常に重要となる。これは境界層の降下により、青潮発生時の無酸素水域の到達範囲が減少することが期待されるためである。しかしながら、実際には平成18年10月に大規模な出水が生じるまで、過去数年間に渡り、この塩淡水境界面は上昇傾向にあり<sup>1)</sup>、塩淡水境界層の上昇の抑制、もしくは降下させるための、何らかの対策が求められている。

このことから、平成17年より網走川における湖の直下流に堰を設けることで、湖内への塩水遡上を抑制するための現地実験が行なわれている。この堰は、漁業への影響が少ないと考えられる冬季に一時的に設置されるものであり、基本的に、大潮時などの塩水の流入を抑制し、淡水の流下を可能な限り許容することを目的としている。これまで、閉鎖時の堰の高さや、堰を設置するタイミングなどオペレーションの違いに関し、塩水流入量などが定量的に観測され、個々の手法に関し検討が行なわれてきた。このような現地観測に基づく結果は、塩淡水境界層の制御手法の検討に関し、最も重要で信頼できる結果ではあるが、費用面や周辺関係者の理解が必要である点な

ど、実施に当たっての障壁が高いと考えられる。

数値計算等の合理的な手法に基づいて、堰の形状やオペレーションの手法などが事前に検討できた場合、最適な解を得るまでの期間が大幅に短縮できると考えられる。数値計算を用いた、対象を網走川における塩水遡上抑制構造物の効果に特定した研究として、吉川ら<sup>2)</sup>による1次元の塩水遡上モデルによる検討や、工藤ら<sup>3)</sup>による3次元k-εモデルによる透過性構造物の塩水遡上抑制に関する研究などが挙げられる。両者ともに有益な結果を得ているが、用いたモデルの特性上、堰周辺のごく局所的かつ3次元的な流れは対象としておらず、土砂をはじめとした物質輸送に係る堰の周辺での流れ場や、湖と河口部を往来する生物の疎通への影響の考慮といった、詳細な検討を行うモデルへの発展は目標とされていない。界面の躍動や淡水層に混入した塩水の縦横断の希釈などを考える上で3次元的な流れの把握が必要であるほか、特に生態系に関しては、網走湖周辺においてワカサギやシジミを対象とした汽水域での漁業が盛んであることから、今後は局所的な流れ場の解析が可能な新たな手法の適用が期待される。

このような理由から、本研究では、塩水遡上抑制構造物周辺の詳細な流れ場の把握を可能とする3次元LESモデルの構築を行い、堰を越える密度流現象の構造について詳細な検討を行なうことで、流れ場と塩水の輸送の関連を明らかとし、今後の実河川への構造物の設置に関しての知見を得ることを目的とする。今回の研究では、網走川における実現現象と内部フルード数を一致させた基本的な状況での実験<sup>2)</sup>との比較を行うことで、現地に相似した条件下における計算時の境界条件の妥当性や、その中で本モデルの示す特性を検証する。その後、水位の25%および50%の高さを有する堰を水路中央部に設けることで、通常想定される塩水遡上抑制構造物の存在がどのように密度流の流れ場に影響を与えるのか、数値計算結果から考察を行う。

本研究では、限られたケースに対しての検討ということから、得られた結果について一般化を行うことは困難であるが、前述のように相似則上は網走川での状況に近づけており、現実的な条件設定に対する一つの解析例として、意義を持つと考えられる。

## 2. 数値計算モデル

### (1) 基礎式

本研究では流れの数値計算にSmagorinskyモデルをSGS応力のクロージャーとした3次元LES乱流モデルを用いる。また運動方程式に対してBoussinesq近似を仮定している。これらの仮定の下、空間的に粗視化された基礎式は以下の連続式(1)、Navier-Stokes方程式(2)、および密度の移流・拡散方程式(3)となる。(3)式で得られた密度の分布を(2)式に代入することで、運動方程式中に塩分による密度変化の影響を考慮する。

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial (\overline{u}_i \overline{u}_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\nu_e \overline{S}_{ij}) + g_i - \delta_{i3} g \frac{\overline{\rho} - \rho_0}{\rho_0} \quad (2a)$$

$$\nu_e = \nu + \nu_t \quad (2b)$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 (2\overline{S}_{ij} \overline{S}_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad (2c)$$

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (2d)$$

$$\frac{\partial \overline{\rho}}{\partial t} = - \frac{\partial (\overline{\rho u_j})}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_e \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

ここで文字上の横線は空間的に粗視化された値, 下付き文字  $i$  は座標系の各成分を示し,  $u_i$ : 流速,  $x_i$ : 空間座標,  $t$ : 時間,  $\rho$ : 流体の密度,  $\rho_0$ : 基準となる流体の密度 (ここでは淡水の密度),  $g_i$ : 外力の加速度 (ここでは重力加速度の各方向成分),  $\nu$ : 動粘性係数,  $\alpha_e$ : 密度の拡散係数 (ここでは  $\nu$  により評価),  $C_s$ : Smagorinsky 定数,  $\Delta = (\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3)^{1/3}$ ,  $\Delta x_i$ : 格子スケール,  $P = p + 2/3 \rho q$ ,  $p$ : 圧力,  $q$ : SGS 運動エネルギーである.

過去の密度流に対する LES の適用例としては, 中山ら<sup>4)</sup>による冷氣フロントの侵入現象の再現計算などが挙げられ, そこでは温度のエネルギーへの影響を考慮するために  $k$  の移流・拡散方程式を加えた 1 方程式型のモデルを用いている. 一方, 本研究ではこのような高度なモデル化を行わず, 単純に 0 方程式型のモデルを用いるものとする. また Smagorinsky モデルを用いた物体周りの密度流解析に関しては, 中山ら<sup>5)</sup>が検討を行っており, 乱流量を除いて, 平均的な流れ場の再現に関しては良好な結果を得ている. 本研究においても, Smagorinsky モデルによって基本的な流れ場の性質は再現可能であると考え, モデル構築の簡便性や, その性質に対する十分な理解が進んでいる点などを考慮し, 同モデルを適用した.

筆者による既往の研究例<sup>6)</sup>においては, 境界適合座標系を用いているものの, 水面での境界条件を rigid-lid 条件としており, 流速ベクトルに関してはデカルト座標系における成分を用いていた. しかしながら本研究では最終的に現地での再現計算および予測計算を視野に入れており, 堰周辺での局所的な水位変動などを取り扱うことが必要とされるほか, 曲がり部などの複雑形状を有する流路に対して適用可能であることが求められる. このため, 以下の運動学的条件(4)を用いた水位変動の計算を行い, 流速ベクトルを反変成分として取り扱う移動境界適合座標上<sup>7)</sup>に基礎式を展開することで, 実際の計算を行っている.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u_0 \frac{\partial H}{\partial x} + v_0 \frac{\partial H}{\partial y} = w_0 \quad (4)$$

ここで,  $H$ : 水位,  $u_0$ ,  $v_0$ : 水表面での流速の水平方向成分,  $w_0$ : 水表面での流速の鉛直方向成分,  $x$ ,  $y$ : 座標系の鉛直方向軸である.

## (2) 計算手順

本研究における数値計算では, 移流項計算に CIP 法<sup>8)</sup>を用いる. CIP 法においては, 運動方程式中の時間微分と移流項のみを取り出して個別に計算を行う必要があることから, 本研究における計算手順として, fractional step 法を用いている.

まず圧力項に関しては SMAC 法を用いることで連続式(1)との連立を行い, さらに式(4)により得られた水位を代入して繰り返し計算を行うことで, 水位, 圧力の次ステップの収束値を求める. 粘性項の計算に関しては, 境界部以外では中央差分で評価を行い, 固体壁を有する境界に対しては, 粘性底層分布則と式(5)に示す対数則を切り替えて用いる二層モデルを適用している.

また同時に式(4)により密度の移流・拡散を計算し, そこで得られた結果を次ステップの(2)式による流れの計算に

用いることで、両者間のフィードバックを行う。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{K} \ln\left(\frac{u_* z}{\nu}\right) + B \quad (5)$$

ここで、 $u_*$ : 摩擦速度,  $K$ : カルマン定数(= 0.4),  $B$ : 実験により定められる定数(= 5.5)である。

変数はスタッガード格子状に配置され、流速の各成分はセル境界に、圧力および密度はセル中央で定義するものとする。

### (3) 計算条件

本研究では、計算の対象として、吉川ら<sup>2)</sup>による塩水遡上の水理実験(透過性構造物なし)の値を参考とする。実験施設の概略図を図-1に示す(詳細については文献<sup>2)</sup>を参照)。ここでは、下記の式(6)で定義される $\varepsilon$ の値( $=0.036$ )を現地での値と一致させることで内部フルード相似則を満足させている。

$$\varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad (6)$$

ここで添え字 1 は上層, 2 は下層を示す。また内部波の安定条件に関しては、水路の供給流入能力内で最も不安定となるよう設定している(Keulegan 数=0.108)。この実験値を基として、密度差や流入流量などがほぼ同一となるように計算条件を定める。

計算条件の概略図を図-1に、計算領域の形状を図-2に示す。塩水密度: 1030(kg/m<sup>3</sup>), 淡水密度: 1000(kg/m<sup>3</sup>), 水路長: 9.2(m), 水路幅: 0.2(m)としている。計算での水理条件は、領域上流側からの淡水の流量: 0.0002(m<sup>3</sup>/s), 領域下流側下層における上流に向けた塩水の流量: 0.00037(m<sup>3</sup>/s), 水路勾配: なし, 上流端水深: 0.102(m), 下流端水深: 0.102(m)としている。下流端での塩水の流入に際しては、境界での密度勾配 = 0, かつ鉛直方向に一樣な密度分布を与えている。また流速の境界での分布は、上流端の淡水流入に関しては対数分布, 下流端の淡水の流出と塩水の流入部分に関しては一樣な分布を与えている。計算に用いる Smagorinsky 定数は、 $C_s=0.1$  とする。

堰に関しては、堰を設置しないケース (Case 1), 水深の 25%の高さの堰を設置するケース (Case 2), 水深の 50%の堰を設置するケース (Case 3) の 3 ケースに関して検討を行った。堰は計算領域の中央に設置するものとする。

また計算時の格子数を、流下×横断×鉛直方向にそれぞれ、200×40×40とし、堰の設置を行う水路中央部での流下方向解像度を密にしている。流下方向の格子幅は、最小で 0.02(m)である。また計算時間きざみを 0.001(s), 計算終了時刻を 300.0(s) (計算ステップ総数は 300000 ステップ)としている。本モデルを使用した開水路流の計算結果から、流れが定常な状態に達するために 100000 ステップ前後が必要なことが確認されているため、フロントの堰への到達後 (150(s)前後) に十分なステップ数を確保している。上流端および下流端ともに、流入流量に応じた流速分布と水位を与え、境界条件としている。計算開始から 50(s)の間は、塩水を流入させず、淡水部分のみ境界部に流速を与え、ある程度定常な流れ場になるのを待った後に、塩水の下層からの流入が生じるように設定した。

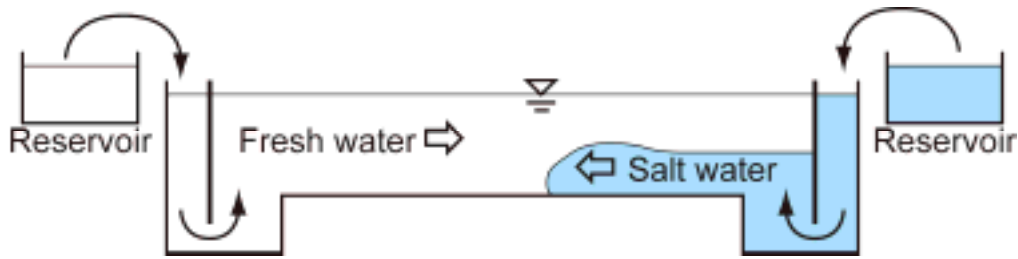


図-1 吉川ら<sup>2)</sup>の実験装置の概略図.

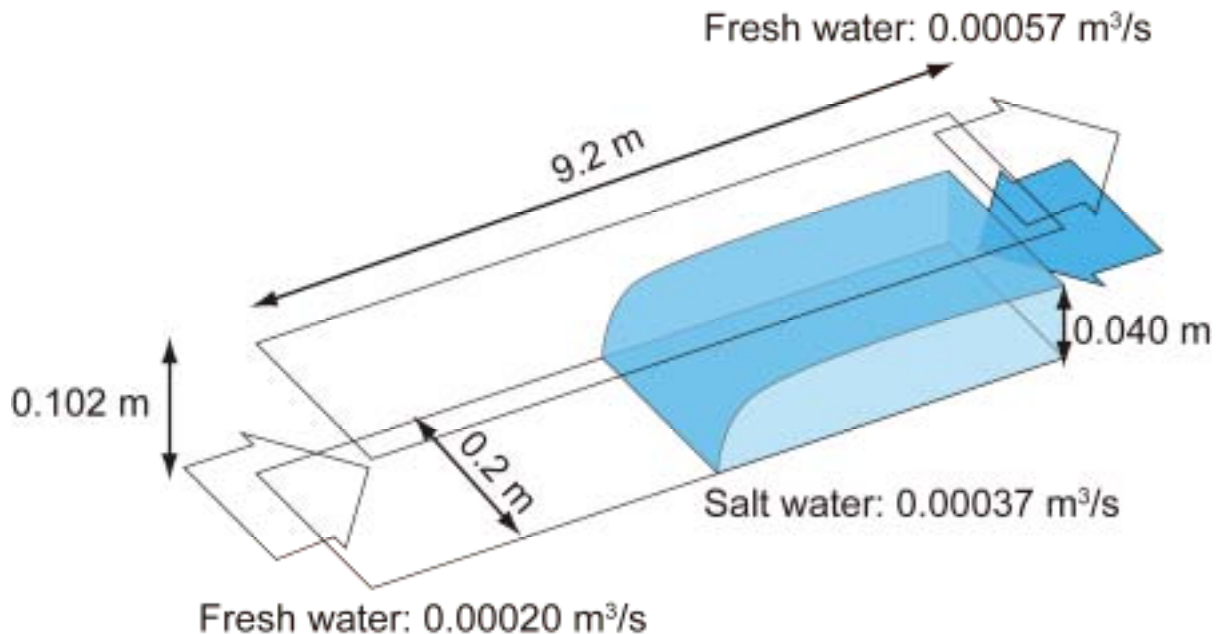


図-2 計算条件の概略図.

### 3. 計算結果

#### (1) 実験との比較

本研究では、構築されたモデルの妥当性の確認のために、先述した吉川ら<sup>2)</sup>の既往の実験結果を用いて、比較を行う。実験結果における各時間での密度フロントの侵入の様子を図-3に示す。ここでは、蛍光染料によって可視化された塩水層と無色の淡水層の境界面を画像処理的に抽出したものにより、密度フロントの形状が示されている。また、実験結果における表記に従い、時間に関しては Case 1 において密度フロントが水路中央を通過した時間を時刻 10(s)とし、また流下方向に関しては、同様に水路中央を 0(m)、上流に向かう方向を正と定義した。

同様に、堰を設けないケースでの数値計算結果（横断方向中央断面）におけるフロントの進行状況を密度コンター図として図-4に示す。数値計算結果における密度境界面の形状としては、工藤ら<sup>3)</sup>の例に倣い、鉛直方向での密度が  $1002(\text{kg}/\text{m}^3)$  を超える位置を実線により描写することで示している。

図-3 および図-4 より、密度フロント先端の進行速度は、実験結果が約  $0.048(\text{m}/\text{s})$ 、計算結果が約  $0.040(\text{m}/\text{s})$  程度と示された。計算結果では進行速度をやや過少に見積もっているが、このような差の生じた要因としては、図-1に示された実験施設の形状と図-2に示された計算領域の形状が完全に一致していないことから、特に下流端での塩水の流入に関し、その形状や時間的変動に差異が生じたことが考えられる。

蛍光染料で示された実験でのフロント形状の最大高さに関しては、およそ  $0.04(\text{m})$  の値を取っているのに対し、密度  $=1002(\text{kg}/\text{m}^3)$  の等値面で定義された計算結果の場合は、同様に  $0.04(\text{m})$  となっており、比較的よく再現されていることが確認される。フロントの詳細な形状に関する比較に関しては、フロント後方のくびれの位置や形状

など、実験結果と計算結果の間に、やや違いが見られる。計算における密度界面の定義が、必ずしも可視化により得られた実験での定義と一致するものではないこともこのような差異の要因であると考えられるが、格子解像度を高く設定した領域（流下方向での水路中央）にフロントが侵入するまでの間に、格子間隔の広い領域（上下流端近傍）で濃度計算の精度が低下している可能性もあるなど、詳細な形状の差異に関しては、この結果からは議論が困難である。この結果に対する検討として、後の章で新たな境界条件の設定法を提案し、考察を行う。

### (2) 計算によるケースごとの比較

前節においてモデルがある程度の再現性を有していることが確認されたことから、このモデルを用いて他ケースの検討を進める。先の検討ではフロントの詳細な形状に関しての再現性までは確認できなかったが、ここからは実験との比較を離れ、計算結果同士での相対的な差異に対し検討を行う。まず、堰を設けた場合の計算結果について、結果を図-5 (Case 2, 堰高さ: 水深の 25%) および図-6 (Case 3, 堰高さ: 水深の 50%) に示し、各時刻でのフロントの進行状況 (計算時刻を図-3 と一致させている), およびその形状を検討する。界面の定義に関しては、図-4 と同様、密度  $1002(\text{kg}/\text{m}^3)$  の等値面としている。

図-4, 図-5, および図-6 における 0.0(s) から 10.0(s) にかけて境界面の比較から、おおよそその進行の経過に大きな差異は存在しないが、堰の高さが高いケースほど、フロントの到達が早まることが確認される。実験および計算では、図中フロントの進行と逆方向に、左から右に向かう淡水の順流を条件として与えているため、堰の存在がその流れを底面近傍で抑制することで、フロントの到達が早まったことが考えられる。

一方、フロントの堰到達時刻以降の形状は、Case 1 (堰なし), Case 2 (25%高さ堰), Case 3 (50%高さ堰) で大きく異なった結果を見せており、Case 1 においてはそのままフロントの進行が続くが、Case 2 では一旦進行が堰により抑制された後に、堰下流 (図-5 中右側) において境界面水位が上昇し、十分な高さに上昇した後に堰を乗り越えるように再度界面の進行が生じていることがわかる。Case 3 では、フロントの進行は堰によって強く抑制されている (計算時間中は高密度の塩水の越流は確認できなかった)。図-6 中のコンター図の形状から、密度境界面の高さが上昇した後も、順流の淡水の流れが、そのまま境界面上部に拡散した塩水を下流へと連行していることが推測される。これにより、水深を超えるような高さの完全閉鎖型の堰を設けない状況でも、上流からの順流が存在する状況では、固定型の堰によって塩水遡上を長時間抑制させ得る可能性が示されたと言える。

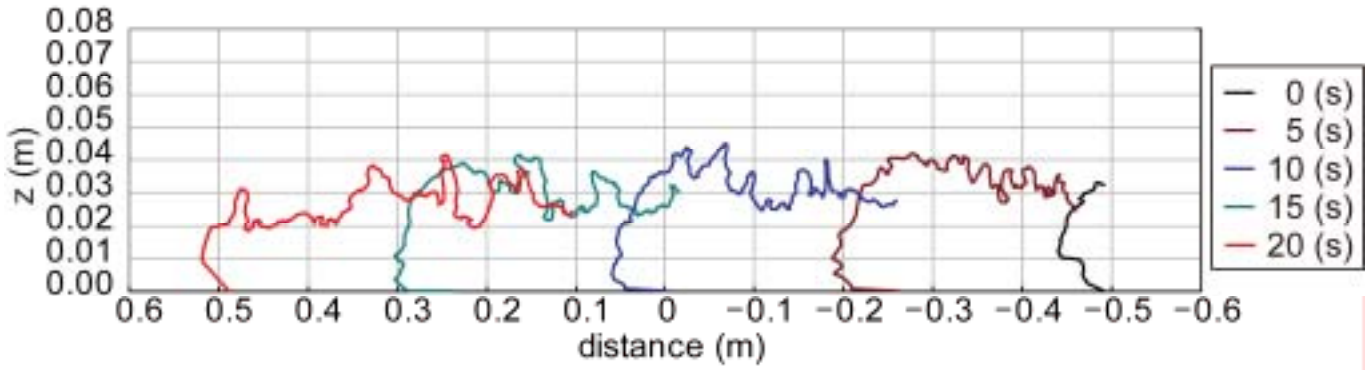


図-3 実験結果<sup>2)</sup>の画像解析による密度界面 (堰なし) 蛍光染料により界面を可視化。



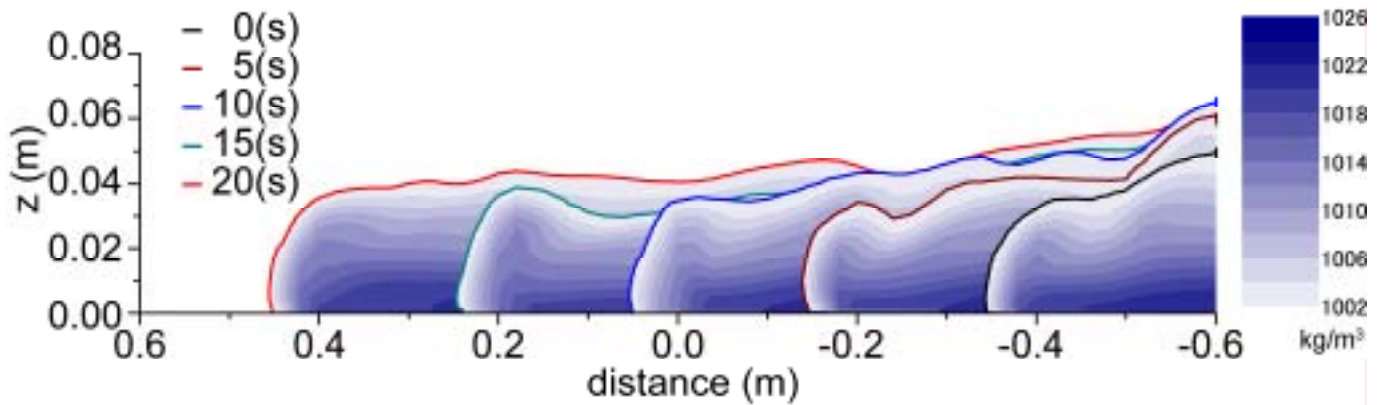


図-4 計算結果：密度界面(  $\rho=1002\text{kg/m}^3$ , 実線)および密度コンター図 (Case 1, 堰なし)。

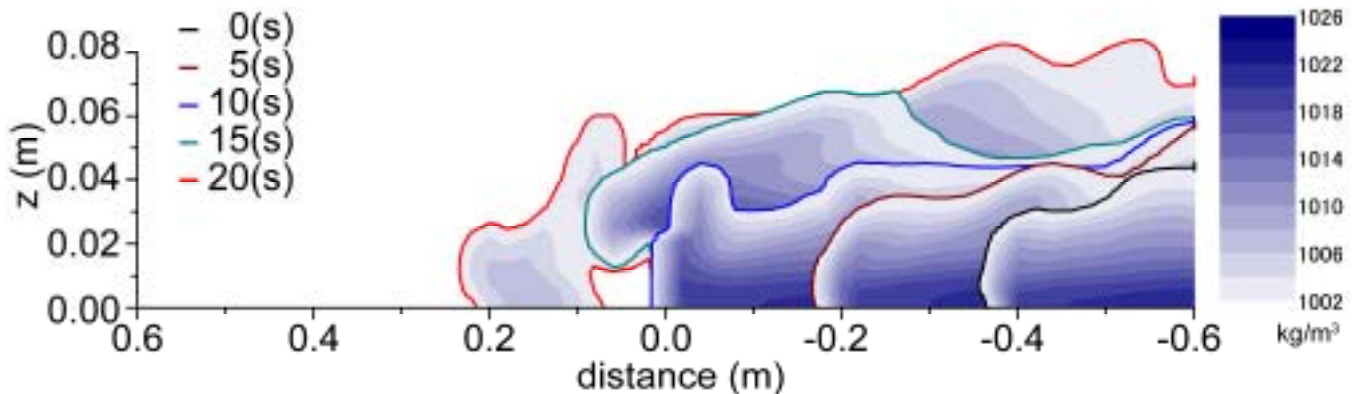


図-5 計算結果：密度界面(  $\rho=1002\text{kg/m}^3$ , 実線)および密度コンター図 (Case 2, 堰高さ=水深の 25%)。

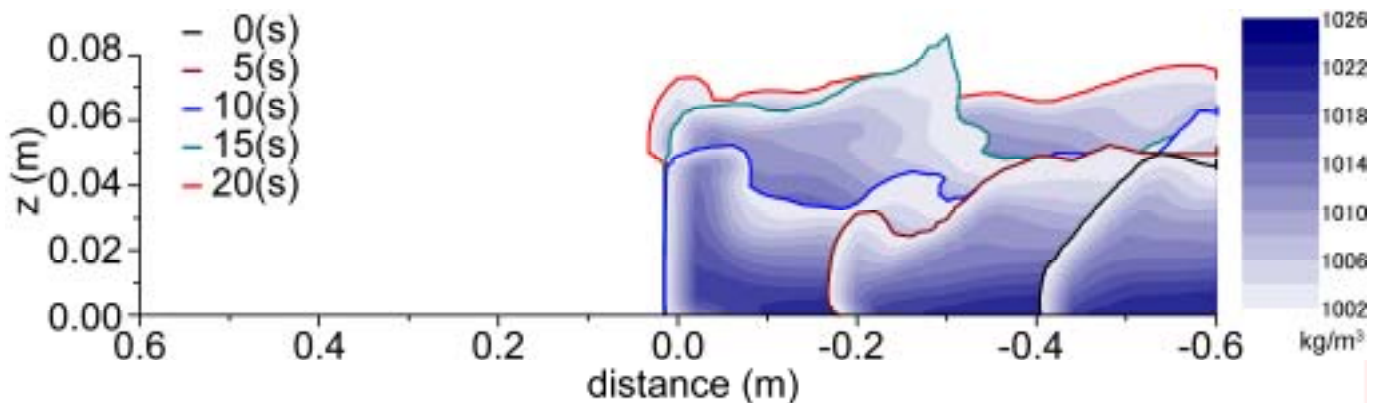


図-6 計算結果：密度界面(  $\rho=1002\text{kg/m}^3$ , 実線)および密度コンター図 (Case 3, 堰高さ=水深の 50%)。

### (3) フロント進行に関する流れの詳細な検討

前節まででは、堰の設置がもたらす塩水遡上に対する影響を、全体的な視野から定量的に行なったが、この節では、密度等値面と流れの瞬間的な構造の可視化により、フロント進行過程での流れのメカニズムの把握を試みる。密度フロントの可視化に際しては、これまでと同様に密度  $1002(\text{kg/m}^3)$  となる等値面を描画することで行なう。一方、3次元性を有した流れに関しては、本研究では堰周辺の局所的な流れの解明を目的としていることから、渦のもたらす組織構造の把握が重要となる。ここでは  $\lambda_2$  法による瞬間的な等値面を描画することで、領域内部の渦の組織的構造を探ることとする。 $\lambda_2$  法は Jeong ら<sup>9)</sup>により提案された手法であり、 $S^2 + \Omega^2$  テンソルの固有値のうち 2番目に大きい値( $\lambda_2$  パラメータ)が負となる地点を渦の中心部であると考えられる。実際の可視化では、この  $\lambda_2$  パラメータが負である部分の等値面を描画することでチューブ状の構造が描かれるが、この構造を回転の中心軸とみなし、渦の構造の把握を行う。

図-7は Case 1 (堰なし)での  $t=10.0(s)$ における瞬間的な密度 $=1002(kg/m^3)$ の等値面(青い面で表示),および  $\lambda_2 = -2.0$ の等値面(白い面で表示)を同時に示したものである。ここで青い等値面は塩淡の境界を,白い等値面で示された構造は回転運動の軸を示す。この図を基に,堰を設置しないケースの流れの様子を検討することで,本計算での条件における,密度フロント周辺での流れの基本的な構造の検討を行なう。

$\lambda_2$ 法により示された回転軸を示す構造は,フロントの上層に側面に沿う形で流下方向に長く存在している(フロント流方向にも同様の構造は見られるが,下流側のものほど安定していない)。これは密度フロントの上部において,淡水層の順流の両岸部分に,2次流が存在することを示唆している。この2次流の近傍では,密度界面が水面近傍まで持ち上げられていることから(一例を図-7中に矢印で示す),この構造がフロント後方で密度の淡水層への拡散に大きな役割を果たしていることが考えられる。

この2次流の発生に関して考察を行うために,図-7でのフロント先端から矢印部分にかけての一部を拡大し,横断面での流速成分によるベクトル図とともに示したものが図-8である。この図より,フロント直前において,フロントに乗り上げるような横断面中央上部に向かう流れが存在することが確認でき,これにより上流側の赤い矢印で示す横断方向の流れが強められていることが分かる。この後,水面近傍では表面の振動に応じた流速の変動が生じるが,赤い矢印で示された回転は強度を変化させながらも下流方向に存続し,下流側の矢印で示されたような回転を壁際で断続的に生じさせ,密度界面の湧き上がりに影響を与えていることが確認される。水路幅に対する水深の比が  $1/2$  と大きく,壁面の影響が大きい状況下での結果であるが,フロント後方で2次流の影響が重要であることが示唆されたと言える。

次に,堰を設けた場合のフロント周辺の流れに対して,同様の可視化による検討を行なう。図-9は Case 2(25%高さ堰)での  $t=20.0(s)$ における瞬間的な密度 $=1002(kg/m^3)$ の等値面(青い面で表示),および  $\lambda_2 = -2.0$ の等値面(白い面で表示)を同時に示したものである。この時刻では,すでに一部の塩水が堰を超えて上流側に侵入していることが確認できる。また,フロントの後方で,Case 1と同様に壁際上層において2次流の軸が確認できる。この2次流を詳細に検討するため,図-9での堰周辺の一部を拡大し,横断面での流速成分によるベクトル図とともに示したものが図-10である。図-10より,堰を有する Case 2においても,密度界面の湧き上がりの近傍における2次流の構造が,図-8で示された堰がない場合の Case 1のものと同様であることが確認できる。このような傾向は,図-11および図-12に示された(それぞれ Case 2の図-9,図-10に対応) Case 3の結果においても確認された。

#### 4. 考察

3(1)節における計算結果と実験結果との比較において,フロントの進入速度に差異が存在した点に関し,境界条件の設定の観点から考察を述べる。

上記比較における表面上の主要な差異はフロントの進入速度であるが,妥当性が疑われるもう一つのポイントとして,フロント部分の濃度の問題がある。これは,図-4に示された濃度分布において,流入端での濃度の値( $1030kg/m^3$ )に近い濃度を有する部分が,底面近傍のごく一部にのみ現れているという点であり,同時に,筆者がこれまで検討を行ってきた密度流計算の結果と大きく異なる点である。過去の研究例<sup>6)</sup>においては,フロントの形成においてダムブレイク型の条件を設けており(時刻0において鉛直に存在する密度境界面が自由に運動を開始),これらの計算結果においては,フロントは高濃度を保ったまま,淡水層中へと流入していった。このことから,本論でのフロント進入速度の計算と実験との差異は,フロントの初期の形成機構における条件設定の問題であると仮定し,本論での計算条件の初期段階にダムブレイク型のフロント形成を行う領域を設定し,結果について検討を行った。このときの初期条件における濃度の分布を図-13に示す。



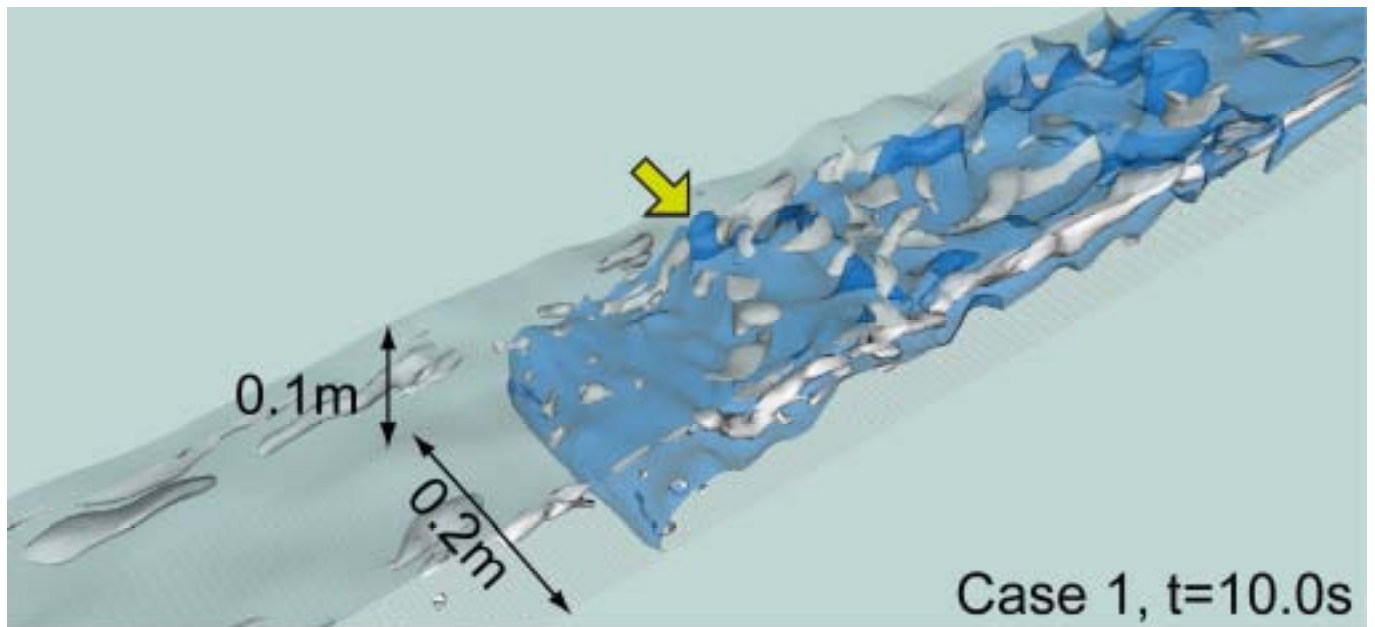


図-7 数値計算 (Case 1, 堰なし)  
 t=10.0(s)における密度  $1002\text{kg/m}^3$  の等値面(青),  
 および回転の軸を示す  $\rho_2 = -2.0$  の等値面(白).

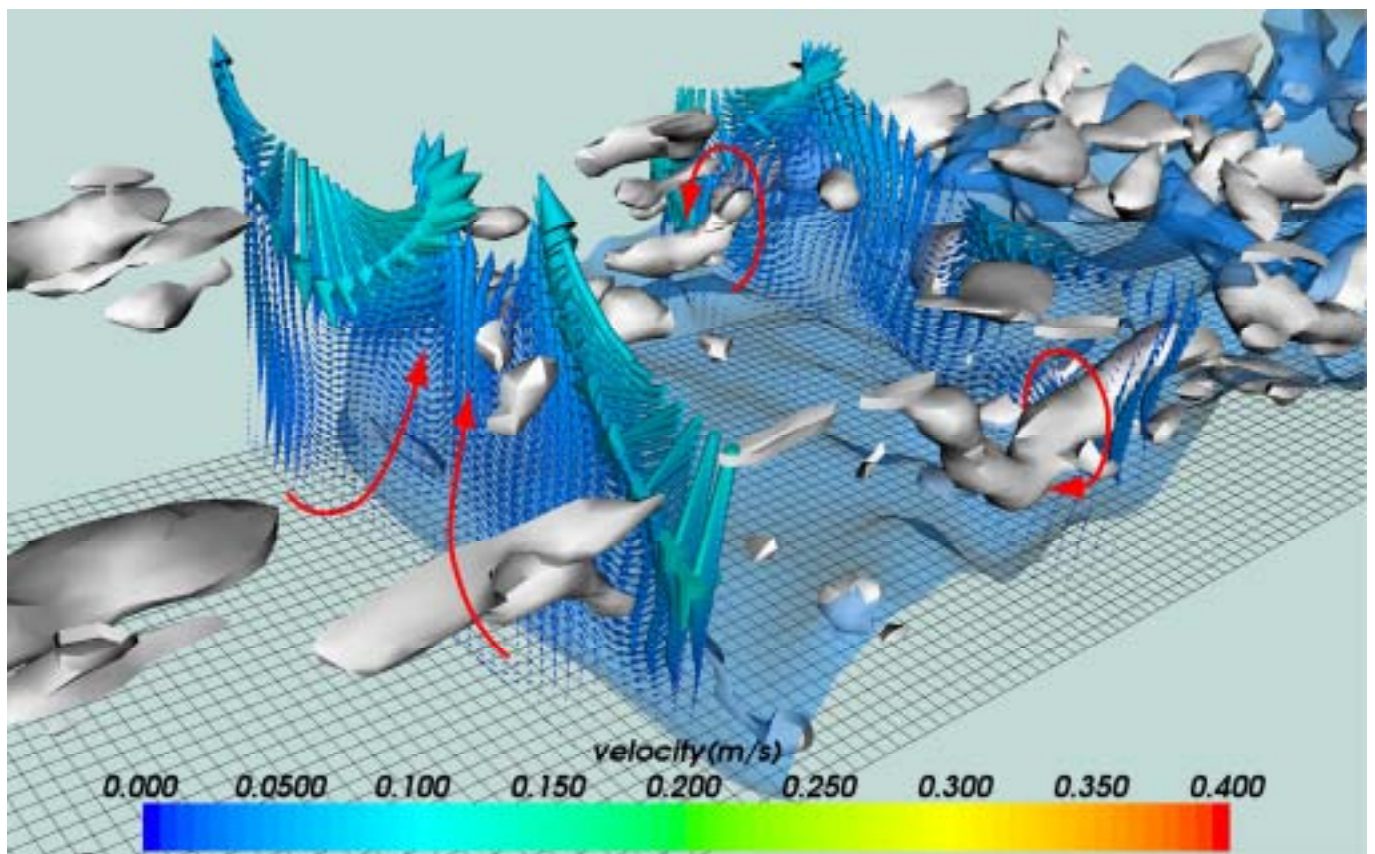


図-8 数値計算 (Case 1, 堰なし) 横断面での流速成分  
 赤矢印は回転方向 (図-7 を拡大).

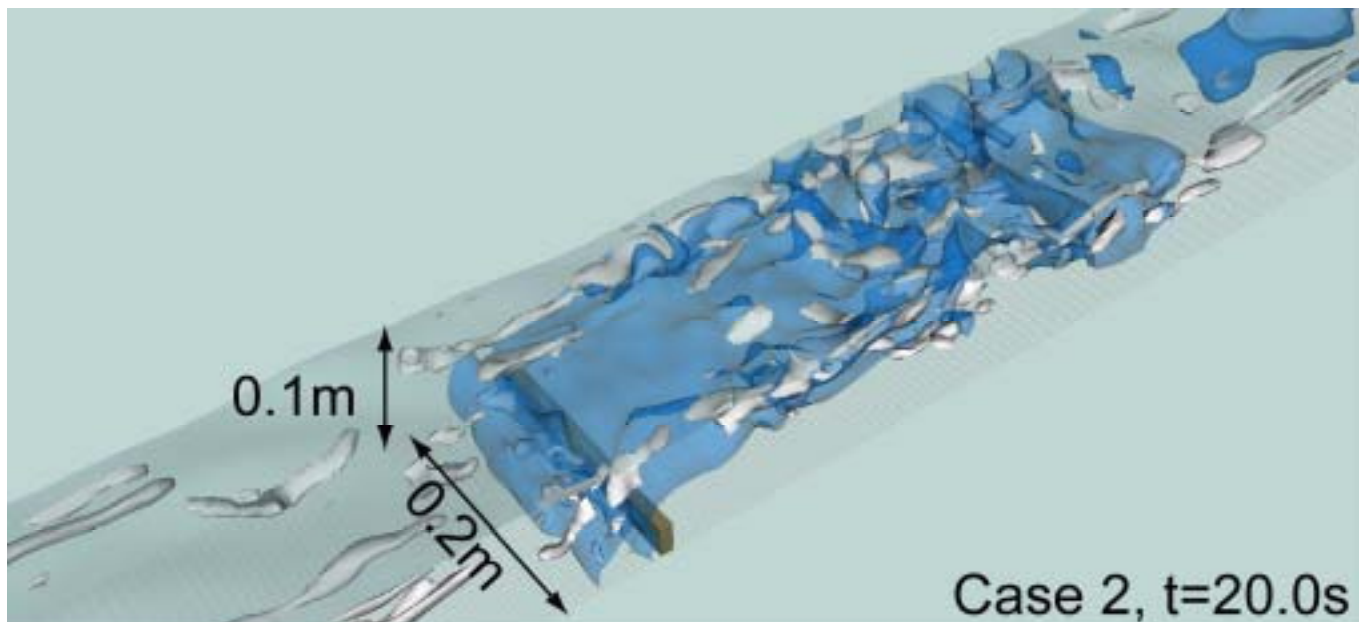


図-9 数値計算 (Case 2, 25%高さ堰)  
 $t=20.0$ (s)における密度  $1002\text{kg/m}^3$  の等値面(青),  
 および回転の軸を示す  $\omega_z = -2.0$  の等値面(白).

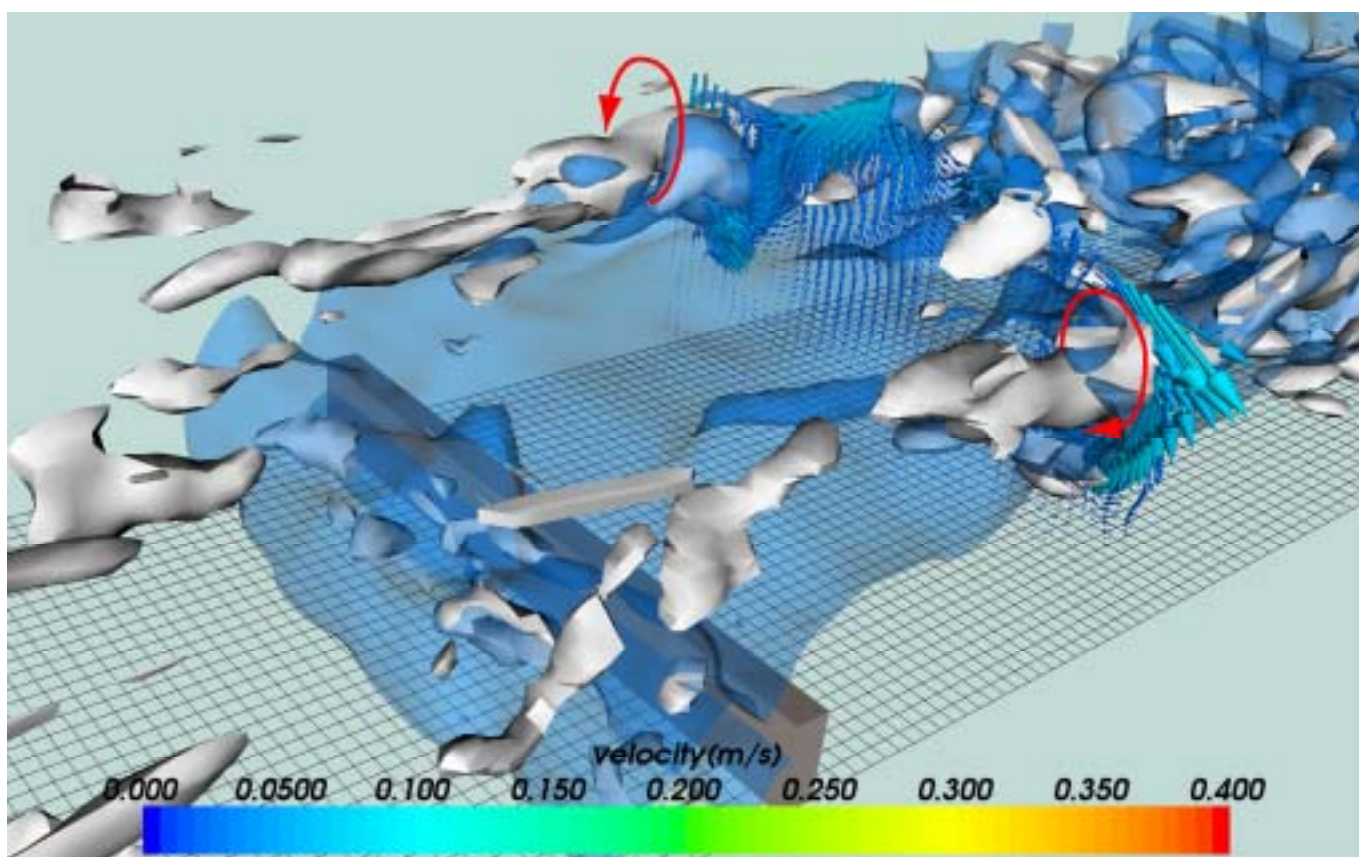


図-10 数値計算 (Case 2, 25%高さ堰) 横断面での流速成分  
 赤矢印は回転方向 (図-9 を拡大).



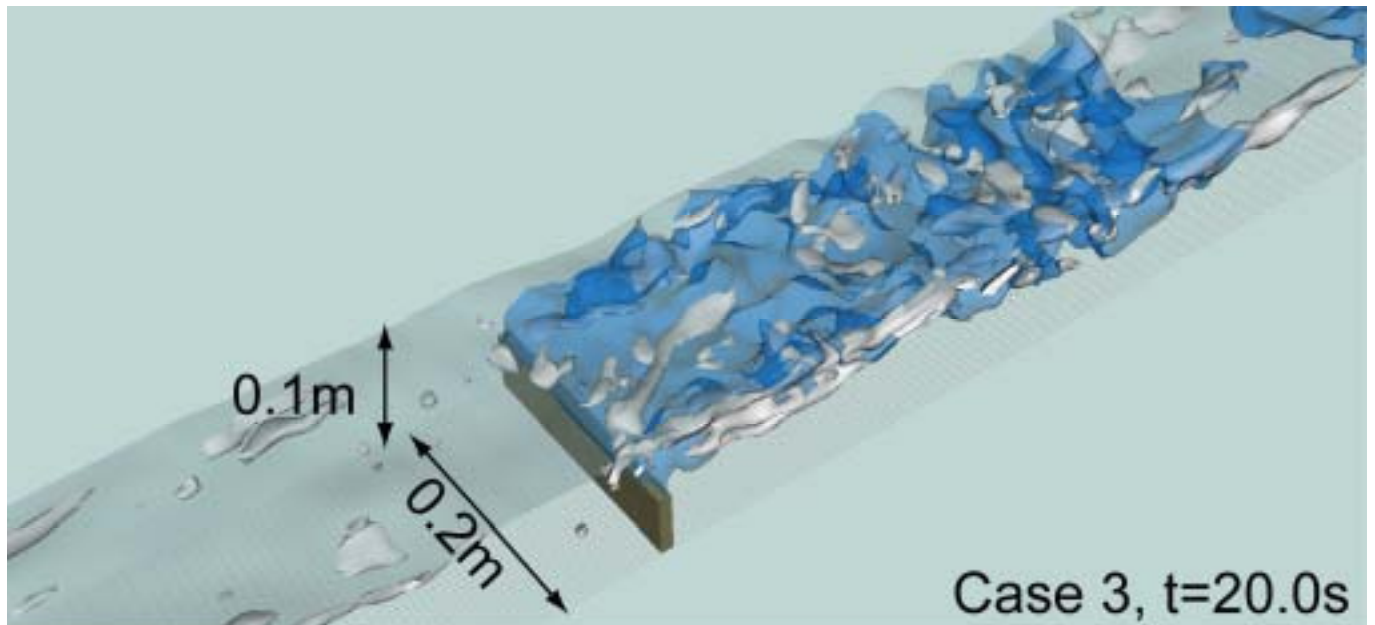


図-11 数値計算 (Case 3, 50%高さ堰)  
 $t=20.0(s)$ における密度  $1002\text{kg/m}^3$  の等値面(青),  
 および回転の軸を示す  $\omega_z = -2.0$  の等値面(白).

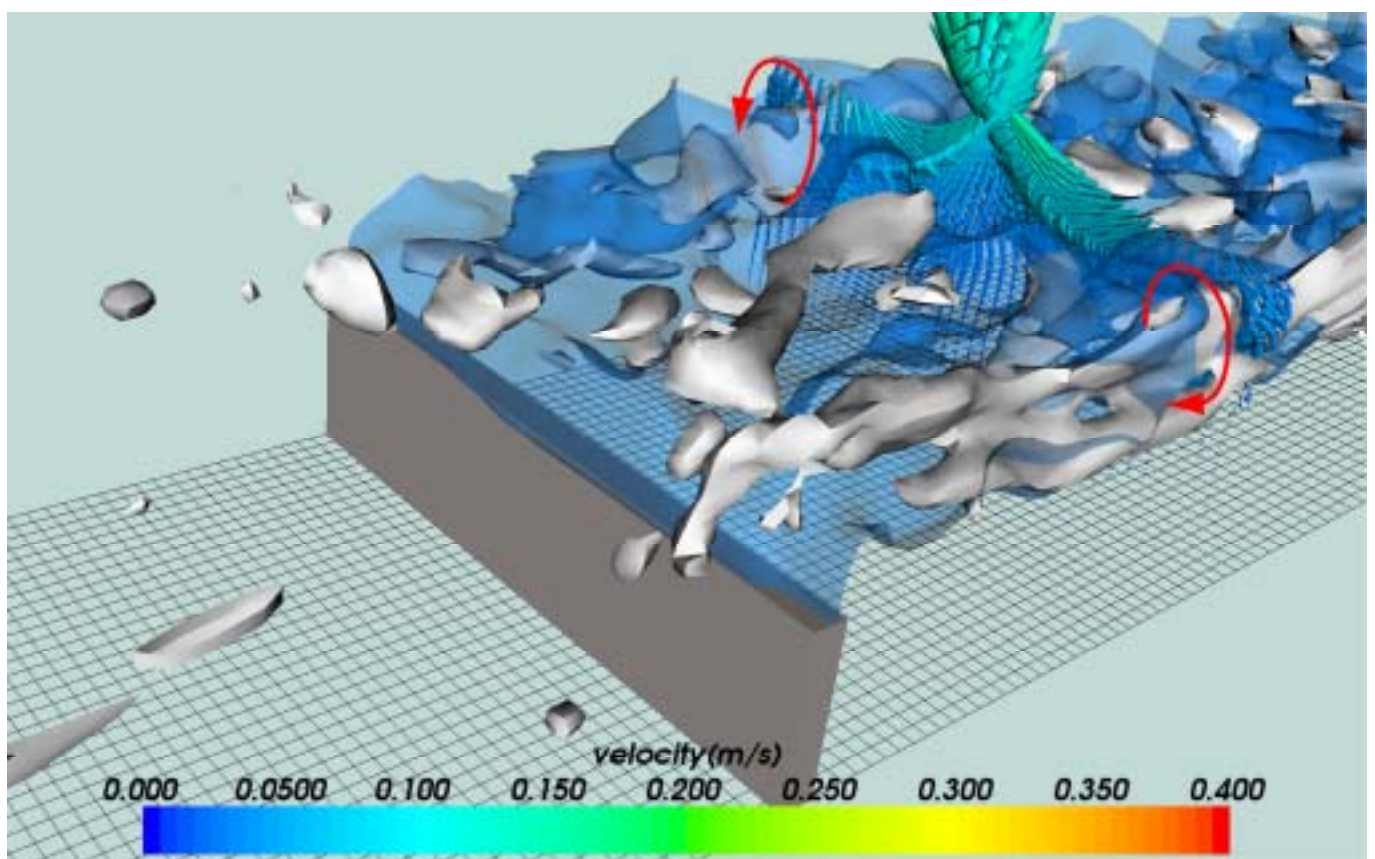


図-12 数値計算 (Case 3, 50%高さ堰) 横断面での流速成分  
 赤矢印は回転方向 (図-11 を拡大).

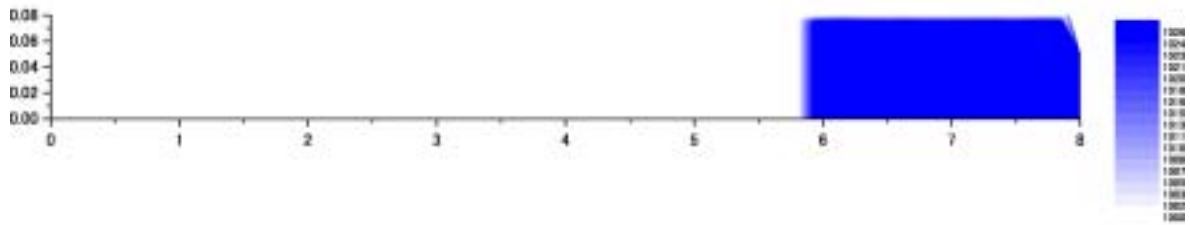


図-13 ダムブレイク型の計算における初期条件での濃度分布(横軸は上流端を 0m としたもの)。

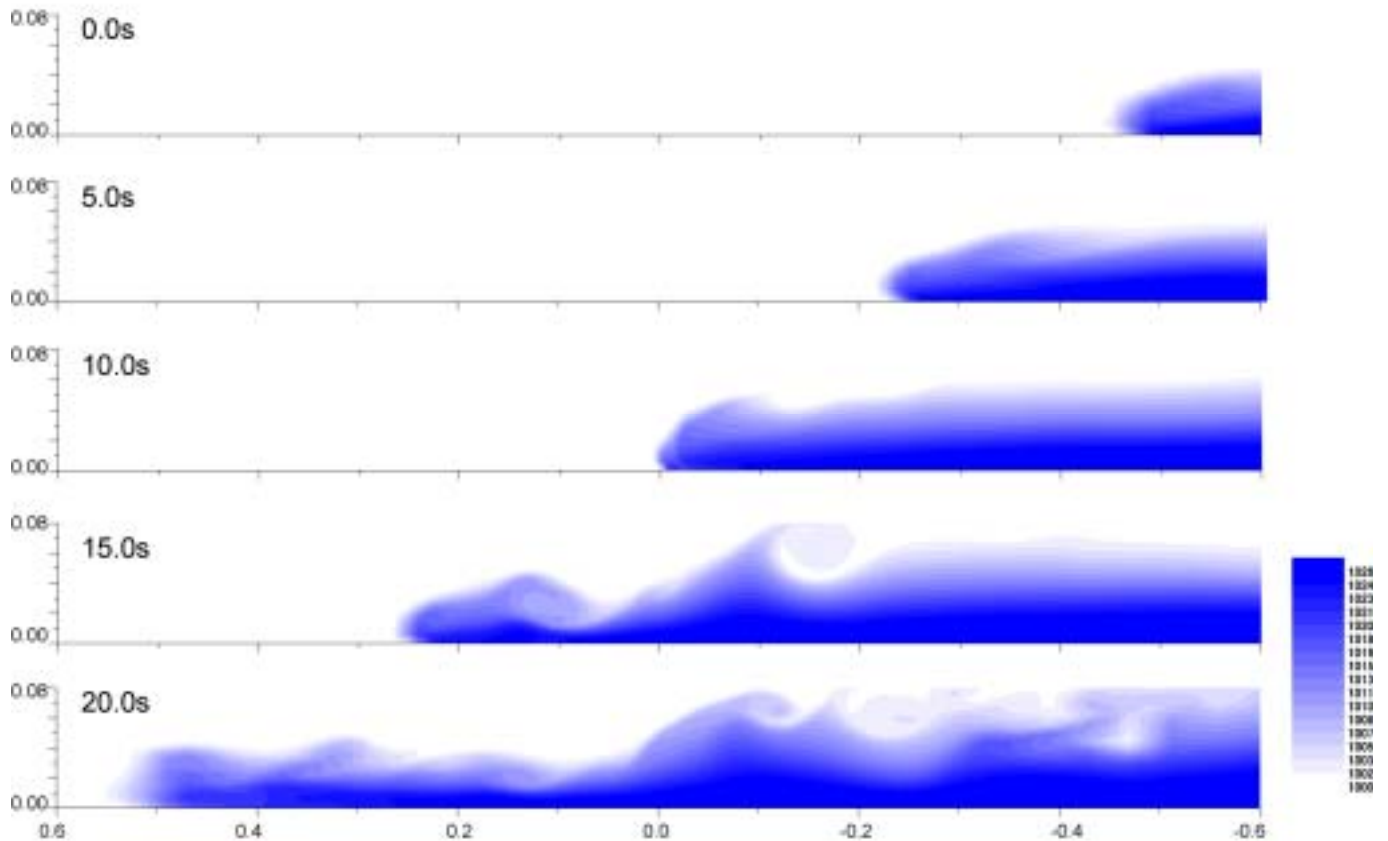


図-14 初期のフロント形成にダムブレイク型の条件を設けた計算例

この条件では、水路下流端から上流に向かって水路長の 4 分の 1 の部分、かつ  $z=0\text{m}\sim 0.08\text{m}$  の領域に塩水部分を設定し、計算開始 50s においてこの塩水を自由に運動させることで、密度フロントの初期の形成を行う。それ以降は、下流端での濃度と流速の設定を 3 節での計算と同様に設定し、一定量の塩水の流入を設定した。計算結果におけるフロント侵入の様子を図-14 に示す。

図-14 より、ダムブレイク型の初期フロント形成機構を導入した計算結果に関しては、フロントの進入速度が約  $0.05(\text{m/s})$  と 3 節において示された実験結果の値に近づくこと、またフロント部分の濃度が、全体に 3 節の計算結果と比較して高くなることが示された。これは、塩水の流入の条件がフロント部分の計算結果の精度に大きく影響を与えることを示しており、実験の再現の場合においても、現地スケールでの実現象の再現においても、そもそもの密度流現象の発生状況を境界条件において正確にトレースする必要があることを示している。本モデルによる現象の検討は、計算負荷の高い 3 次元非定常計算であることから対象領域を比較的小さい規模に区切る必要があるため、必然的に境界条件により密度流の領域内への流入を記述する必要がある。今後のさらなるモデルの適用にあたっては、より物理的に自然な境界条件を記述するための検討が必要であると考えられる。

## 5 . 結論

本論文では、塩水遡上の抑制を目的とした堰の設置に関し、堰周辺の詳細な流れ場の解析を可能とする数値計算モデルの構築と、密度フロント進行に関する 3 次元構造の解明を目的として研究を行った。

用いられたモデルは、Smagorinsky モデルによる 3 次元 LES 乱流モデルの運動方程式に Boussinesq 近似を適用し、密度の移流・拡散方程式と連立させたものである。

既存の実験<sup>2)</sup>との比較より、本モデルがある程度の妥当性を有していることが確認された。堰の塩水遡上抑制に対する効果は、水深の 25%の高さのケースにおいても十分に発揮されるが、堰の高さが水深の 50%となると、今回の条件では、ほぼ完全に塩水の遡上を抑制するという結果が得られた。

また流れの 3 次元構造に関して、密度フロントの上層淡水層の両河岸側に 2 次流が形成され、これが密度界面の淡水層に向けた湧き上がりを促し、密度分布の拡散が進行していることが確認された。

さらに、境界条件を変更した計算結果に対する考察から、本モデルを用いた計算にあたっての精度向上に関しては、境界条件における密度流の流入に関しての設定が、大きく影響することが示された。

## 参考文献

- 1) 北海道開発局網走開発建設部: 第 10 回網走湖水質環境改善施設検討委員会資料, 2008
- 2) 吉川泰弘, 安田浩保, 渡邊康玄: 透過性構造物による塩水遡上抑制効果についての研究, 寒地土木研究所月報, No.657, p.2-14, 2008
- 3) 工藤 拓也, 木村 一郎, 清水 康行, 安田 浩保, 清治 真人: 構造物を用いた塩水遡上の制御に関する数値シミュレーション, 水工学論文集, 第 53 巻, p.1351-1356, 2009
- 4) 中山恵介, 佐藤圭洋: LES モデルによる水平面上張り出しブルームの解析, 土木学会論文集, No.728/II-48, p.97-114, 1999
- 5) 中山昭彦, 岸修士郎: LES による安定成層条件下の気流の再現計算, 水工学論文集, 第 46 巻, p.73-78, 2002
- 6) 赤堀良介, 清水康行: 閉鎖性水域における密度流現象に関する 3 次元乱流モデルによる数値計算, 土木学会論文集, 土木学会, No.684/II-56, p113-125, 2001
- 7) 細田 尚, 長田信寿, 村本嘉雄: 移動一般座標系による開水路非定常流の数値解析, 土木学会論文集, No.533/II-34, p.267-272, 1996
- 8) Yabe, T. and Aoki, T.: A universal solver for hyperbolic equations by cubicpolynomial interpolation I. One-dimensional solver, Comp. Phys. Comm. 66, p. 219-232, 1991
- 9) Jeong, Jinhee. and Hussain, Fazle: On the identification of a vortex. J. Fluid. Mech., 285, p.69-94,1995