

密度成層場における鉛直循環流誘起堤体の効果に関する研究

重松孝昌* ・池田憲造** ・小田一紀*** ・小池敏也****
延廣玲子***** ・遠藤 徹***** ・藤田 孝***** ・戸川 進*****

著者らは、底生生物の生存に致命的な影響を及ぼし、脆弱な生態系構造をもたらす夏季の貧酸素水塊の発生を防止・抑制するため、酸素の豊富な表層水を底層へと供給することができる鉛直循環流誘起堤体の開発を行ってきた。均一密度場におけるその効果は既に検証しているが、本論文では、密度成層場におけるその効果について検討している。温度成層場における効果の検討は数値モデルを用いて、また、塩分成層場における検討は水理模型実験および数値モデルを用いて行っている。数値モデルによる検討に当たっては、ブシネスク近似を用いている。モデルの妥当性は、別途、水理実験を行って検証している。

1. 緒 言

自然再生法の成立を受けて、沿岸環境の修復に関する議論が高まりつつある。なかでも、背後に大都市を抱え、日本の経済に大きな役割を果たしてきた閉鎖性内湾奥部では、人間生活にゆとりや癒しを与える空間としてのいきいきとした沿岸域の創出に向けて様々な技術が開発、試行され始めている。今もなお重要な役割を果たしている港湾施設などが密集する海域では、船舶の航行を妨げることなく、また、港湾機能を損なうことなく環境を修復・改善することが要求される。このような海域では、広大な面積を有する人工干潟などの浅海域を創出することは困難であると考えられる。一方、このような海域では、垂直護岸によって水塊の鉛直混合が阻害され、これに伴って発生する夏季の貧酸素化が、底生生物の生息環境や湾奥生態系、さらには、湾スケールの生態系に重要な影響をもたらしている。したがって、このような高度に人工化した海域の機能を低下させることなく、底層域の貧酸素構造を改善することは重要な課題である。

このような背景のもと、著者らは、酸素の豊富な表層水を底層域に送出して底層域の貧酸素化を防止・抑制することができるような鉛直循環流誘起堤体の提案・開発を行ってきた(重松ら, 2002)。提案堤体は、図-1に示すように、比較的厚みを有する前面壁と不透過壁から成る直立型の構造物で、前面壁は水面近傍に斜面構造を有する上部通水部と、底層近傍の下部通水部とから構成されている。上部通水部から遊水室内に取り込まれた流体が遊水室内で鉛直混合された後に、下部通水部から堤体沖側底層部へと輸送されることによって、酸素の豊富な

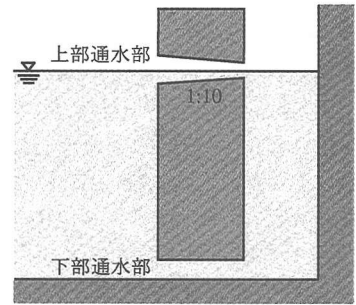


図-1 鉛直循環流誘起堤体の概略図

表層水を底層域へと送出し、底層域の水質・底質環境を改善しようとするものである。提案堤体の均一密度場における効果は、数値モデルおよび水理模型実験によって既に検証されている(重松ら, 2002)。ここでは、温度成層および塩分成層に起因する不均一密度場における提案堤体の効果を、数値モデルおよび水理模型実験によって検討した結果を示す。

2. 温度成層場における効果の検討

(1) 計算モデル

図-1に示すような鉛直循環流誘起堤体の提案に際しては、数値モデルを用いて構造諸元を決定し、模型実験によってその結果を検証するという手順を踏んだ。用いたモデルはLin・Liu (1998)が開発した高次乱流モデルとVOF法を併用したモデルである。このモデルは、均一密度場に対して開発されたモデルである。一方、温度成層場を水理模型実験で再現し、提案堤体の成層場における効果を検証することは容易ではないので、Lin・Liu (1998)のモデルにBoussinesq近似を適用して不均一密度場における解析が行えるように拡張し、不均一密度場における提案堤体の検証を行った。

計算に用いた基礎方程式は、アンサンブルレイノルズ平均操作を施した連続の式とBoussinesq近似を適用したNavier-Stokesの方程式である。

* 正 会 員 工博 大阪市立大学大学院講師 工学研究科都市系専攻

** 正 会 員 工修 関西国際空港(株)建設事務所 企画・技術課

*** 正 会 員 工博 大阪市立大学大学院教授 工学研究科都市系専攻

**** 大阪市立大学 事務局学術交流課技術支援係

***** 学生会員 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻

***** 正 会 員 工修 日立造船(株) 技術本部技術研究部
(株)クボタ 鉄管開発営業部

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} - g_i \beta (\bar{\theta} - \theta_0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\bar{u}_i$: x_i 方向の流速のアンサンブル平均値、 $\bar{p}$: 圧力のアンサンブル平均値、 t : 時間、 ρ : 流体の密度、 ν : 動粘性係数、 g_i : x_i 方向の重力加速度、 θ は水温、 θ_0 は参照水温、 $\beta = 2.5 \times 10^{-4}$ は体積膨張係数、 $Pr = 7.0$ はプラントル数、 $Pr_t = 0.9$ は乱流プラントル数である。

また、式 (2) 中の $-\bar{u}_i \bar{u}_j$ はレイノルズ応力を表しており、ここでは、次式で表される高次の乱流モデルを適用している。

$$\begin{aligned} \bar{u}_i \bar{u}_j = & \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \\ & - \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left[C_1 \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) \right. \\ & + C_2 \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - \frac{1}{3} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \\ & \left. + C_3 \left(\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_j} - \frac{1}{3} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに、 k : 乱れの運動エネルギー、 ε : k の逸散率、 δ_{ij} : クロネッカーのデルタである。また、 ν_t は渦動粘性係数で、

$$\nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad f_\mu = 1.0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

である。また、上式を用いて ν_t を計算する際に必要な k および ε は、それぞれの次の輸送方程式を解いて求めた。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ & - \bar{u}_i \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon + G_k \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{2k} \frac{\varepsilon^2}{\partial} \\ & + C_{1\varepsilon} f_1 \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + C_{3\varepsilon} f_2 \frac{\varepsilon}{k} G_k \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$G_k = -g_i \beta \bar{u}_i \bar{\theta} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$C_{1\varepsilon} = C_{3\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$f_1 = f_2 = 1.0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

式 (4)～式 (7) 中に現れる諸モデル定数は以下のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} C_\mu = & \frac{1}{3} \left(\frac{1}{3.7 + S_{\max}} \right), \quad C_1 = \frac{1}{185.2 + \gamma D_{\max}^2} \\ C_2 = & \frac{1}{58.5 + \gamma D_{\max}^2}, \quad C_3 = \frac{1}{370.4 + \gamma D_{\max}^2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad \gamma = 3.0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

これらの基礎方程式を解いた後、VOF 法を用いて水表面の計算を行っている。

(2) 計算条件および計算結果

計算領域は、水平方向 10 m、鉛直方向 1.2 m とし、計算領域の左端水底部を座標原点とした。計算に用いたグリッドサイズは、 $0 \leq x \leq 8$ m では $\Delta x = 2$ cm、 $8 \leq x \leq 10$ m では $\Delta x = 1$ cm、また、 $0 \leq z \leq 0.7$ m では $\Delta z = 2$ cm、 $0.7 \leq z \leq 1.2$ m では $\Delta z = 1$ cm とした。水深 h は $h = 1.0$ m とし、水底および構造物表面には no-slip 条件を課した。 k および ε の水表面における境界条件として、 $\partial k / \partial n = \partial \varepsilon / \partial n = 0$ のゼロ勾配型の境界条件を課した。水温に関する初期条件は、夏季の大阪湾沿岸域において水深がおおよそ $h = 10$ m の地点の温度差が大きい場合の実測データを参考にして、表層 30 cm の部分の水温を $\theta = 28^\circ\text{C}$ と一定とし、それ以深では $\theta = 23^\circ\text{C}$ と一定とした。

図-2 に、本モデルを用いて温度成層場における鉛直循環流誘起堤体の効果について検討した結果を示す。同図によれば、上部通水部を通して遊水室内に流入した水塊は、遊水室内で混合された後に、下部通水部から沖側海域底層部へと輸送されていることがわかる。図-3 は、下部通水部を通して遊水室から沖側底層部へと流出する流量を求めた結果を示したものである。同図によれば、温度成層場中であっても、提案堤体の下部通水部流量は均一密度場におけるそれとほとんど変化しないことがわかる。すなわち、本計算モデルによれば、ここで検討した程度の温度成層では、提案堤体の鉛直循環流誘起機能には低下が見られず、したがって、堤体前面底層部における貧酸素化現象の発生を抑制できると考えられる。

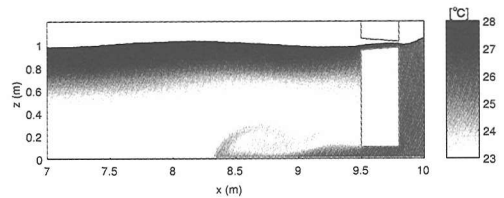
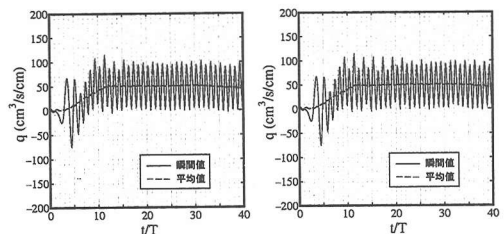


図-2 温度分布の計算結果の一例 ($t/T = 40$)



(a) 均一密度場の場合 (b) 温度成層場の場合

図-3 下部通水流量の計算結果

3. 水理模型実験による塩分成層場における効果の検討

(1) 実験概要

ここでは、図-1に示した鉛直循環流誘起堤体の塩分成層場における効果を、水理模型実験によって検討した結果を示す。実験は、図-4に示すような長さ4 m、幅0.25 m、高さ0.5 mの亚克力製の二次元造波水槽を用いて行った。実験水深は $h=15$ cmとし、実験波浪は、周期 $T=0.5$ 秒、波高 $H=0.75$ cmの規則波とした。夏季の大阪湾湾奥部の水深10 mの海域における塩分の実測分布を参考にして、成層海面および塩分差を決定した。実験では、まず、塩水を12 cmだけ入れた後に、数時間かけて淡水をその上部に3 cmだけ注入することによって塩分成層を形成した。初期の底層塩分 S_0 は、 $S_0=5, 10, 15, 20\%$ と4通りに変えて実験を行った。塩分の計測は(株)KENEK製の5台の塩分計を用いて、サンプリング周波数1 Hzで1時間計測を行った。塩分の計測位置は、図-5に示す地点で行った。実際には、1回の実験で同一水深の塩分の経時変化を測定し、これを4回繰り返して塩分の時・空間変化を把握した。実験に用いた模型堤体は、重松ら(2002)を参照して図-6に示すような諸元とした。

(2) 実験結果

まず、図-7に、初期塩分分布の一例を示す。同図より確認できるように、実験初期に形成された塩分躍層は比較的明瞭な界面を有していた。

実験では、表層の塩分が高くなると容量式波高計の応答性が悪くなったので、目視にて波高の測定を行い、ヒーリーの方法によって反射率を算定した。その結果、反射率はおおよそ0.5~0.7程度と比較的大きな値となった。均

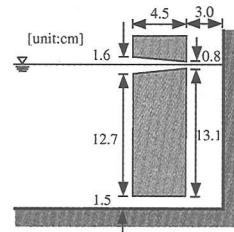


図-6 模型堤体の諸元

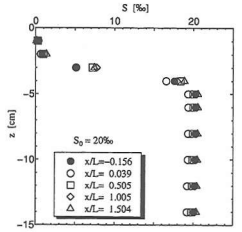


図-7 初期塩分分布の一例

一密度場で行った実験では上部通水部を波浪が通過する際には小規模な碎波が生じていたが、今回の実験ではこのような小規模な碎波の発生が見られなかったことから、今回行った実験ではエネルギー減衰が小さかったのではないかと考えられる。

以下に、塩分に関する実験結果を示す。図-8は、遊水室内における塩分の経時変化を示したものである。図中の縦軸は、断面平均塩分 $\bar{S}$ で無次元化している。横軸の時間は造波機を作動させ始めた時刻を0としている。同図によれば、いずれの初期塩分の場合においても、実験開始後しばらくすると、 $z/h=-0.3, -0.6, -0.93$ のいずれの水深においても塩分が低下し始め、さらに、時間が経過すると、全水深にわたってほぼ同じ塩分を有するようになることがわかる。これは、上部通水部を通して遊水室内に堤体沖側表層の淡水が流入し、堤体前面と遊水室内との圧力差によって遊水室内に存在した塩水が徐々に下部通水部を通して沖側へと流出し、さらに、遊水室への淡水の流入が持続することによって遊水室内の塩分が低下していくものと考えられる。

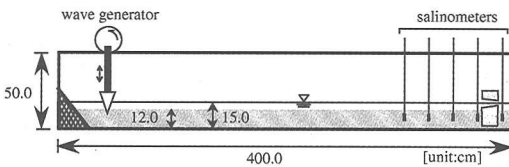


図-4 実験施設の概要

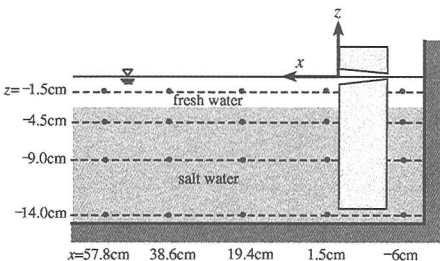
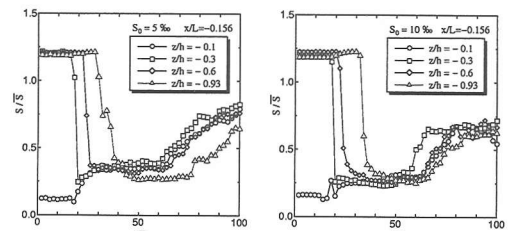
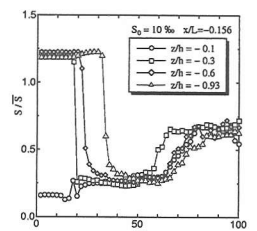


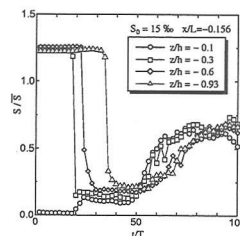
図-5 塩分の測定位置



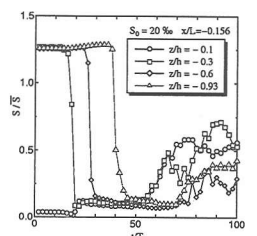
(a) $S_0=5\%$



(b) $S_0=10\%$



(c) $S_0=15\%$



(d) $S_0=20\%$

図-8 遊水室内の塩分の経時変化

図-9は、下部通水部の直沖側 ($x/L=0.039$, $z/h=-0.93$) における塩分の経時変化を示したものである。初期底層塩分が比較的小さい $S_0=5\%$ および 10% の場合には、 $z/h=-0.93$ の底層部の塩分がまず低下し、その後、 $z/h=-0.6$, -0.3 における塩分が低下し始める。一方、初期底層塩分が比較的大きい $S_0=15\%$ および 20% の場合には、 $z/h=-0.6$, -0.3 における塩分がまず低下し始め、その後に、 $z/h=-0.93$ における塩分が低下することがわかる。これは、前述のように、上部通水部から遊水室内に流入した淡水によって遊水室内の塩分が低下した後、下部通水部から低塩分の水塊が沖側底層域へと放出されるが、このとき、塩分差が大きい程、下部通水部から沖側底層域へと出た瞬間に大きな浮力が作用し、その結果、堤体のより近くで低塩分水塊が上昇してしまうためである。また、初期底層塩分が小さいほど、各水深における塩分の差が小さくなることから、提案堤体の直沖側ではより効率的に鉛直混合が行われていると考えられる。この低塩分水塊の上昇に伴って、堤体沖側の塩分躍層が崩壊し始めるものと考えられる。

図-10は、堤体から約 $1.5L$ (L :波長) だけ沖側に離れた地点における塩分の経時変化を示したものである。これによれば、いずれの初期底層塩分の場合であっても、また、いずれの水深においても、時間の経過に伴って $S/\bar{S} \rightarrow 1$ となることから、完全に鉛直混合が行われ、塩分成層が解消していることがわかる。すなわち、少なくとも堤体前面域の $x/L < 1.5$ の範囲では塩分成層の発生抑制・解消効果が期待でき、これによって貧酸素化の発生抑制・解消が期待できることがわかる。

4. 数値計算による塩分成層場における効果の検討

数値モデルによる塩分成層場の計算は、前述のモデルに、さらに、塩分の不均一性に基づく密度差の影響を浮力効果として考慮した運動方程式と、塩分の輸送方程式を解くことによって行った。ただし、今回は、乱れの運動エネルギー k およびその逸散率 ε の輸送方程式中には、塩分の不均一性に基づく乱れの運動エネルギーの生成・消散はないものとして計算を行っている。モデルの検証は、新たに、gravity currentの実験を行い、計算結果と比較することによって行った。実験は、幅 1.0 m 、奥行き 0.15 m 、高さ 0.6 m のアクリル製の水槽を用いて行った。水槽の一端から 30 cm の位置にゲートを設置し、一方には淡水のみを $h=50\text{ cm}$ 入れ、他方には底層部の $h_d\text{ cm}$ だけ比重 1.032 の着色した塩水を入れた。その後、ゲートを手動で鉛直上向きに引き抜き、着色された塩水の挙動をデジタルビデオカメラで録画した。得られたビデオ画像から、静止画像を抽出した。実験では、

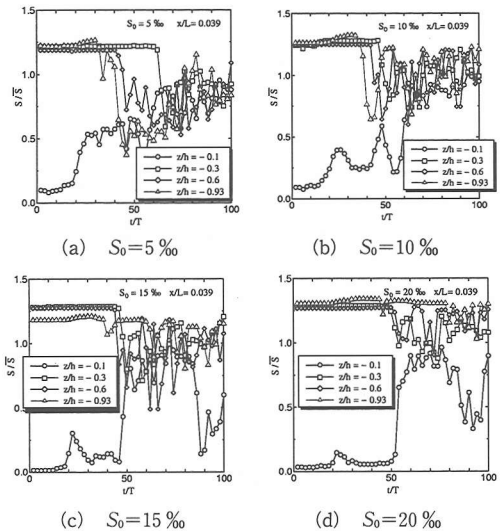


図-9 下部通水直沖側の塩分の経時変化

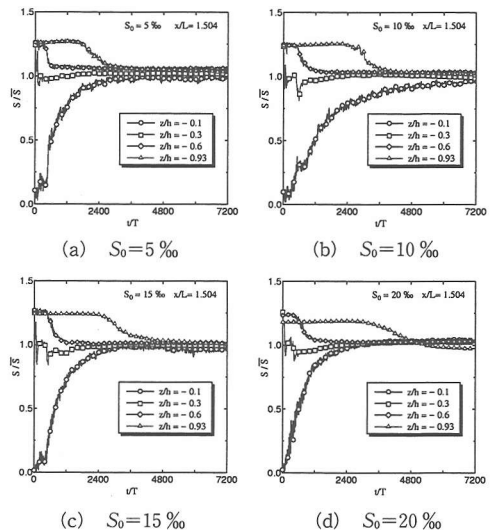


図-10 堤体沖側における塩分の経時変化

$h_d/h=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ と変えて実験を行った。実験ではゲートを引き抜きに有限の時間を有するが、計算では瞬間的にゲート取り除いて計算を行った。

実験および計算結果の一例 ($h_d/h=0.6$ の場合) を図-11(a)に、また、数値モデルによる計算結果を同図(b)に示す。両図の比較により、ここで開発した数値モデルによる計算結果は gravity current の現象をほぼ再現できていると判断した。

次に、開発したモデルを用いて、提案堤体の密度成層場における効果の検討を試みた。計算条件は、前述の物理模型実験を勘案して、水深 $h=15\text{ cm}$ 、初期底層塩分は $S_0=20\%$ 、表層は淡水、塩分界面は水面下 3 cm の位置と

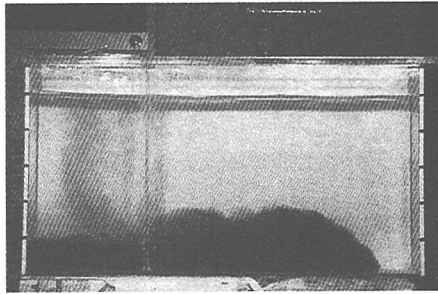
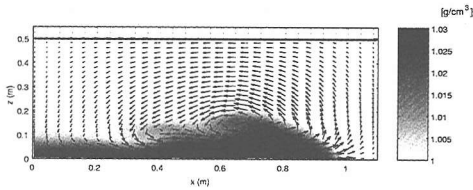
(a) 実験結果 ($h_d/h=0.6$ の場合)(b) 計算結果 ($h_d/h=0.6$ の場合)

図-11 モデルの検証

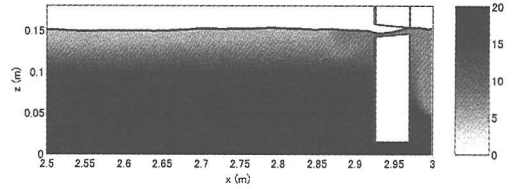
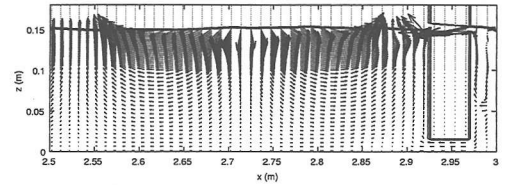
(a) 塩分分布 ($t/h=40$)(b) 流速ベクトル図 ($t/h=40$)

図-12 計算結果の一例

した。計算結果の一例を図-12に示す。図-12(a)は、 $t/T=40$ の時の初期底層塩分 $S_0=20\%$ の場合の塩分分布の計算結果 ($t/T=40$) を示したものである。本モデルによる計算結果によれば、上部通水部より遊水室内に淡水が流入し、遊水室内の上層半分以上の塩分が低下していることがわかる。しかし、前述の実験で観察されたような下部通水部から堤体沖側底層部へと流出する低塩分水塊の存在は見られていない。遊水室内の塩分分布を詳細に見ると、その界面はゆっくりではあるが下降していることがわかった。すなわち、上部通水部から遊水室内に沖側表層部の淡水が流入するという定性的な傾向は計算できているが、定量的な評価を行うためには、計算モデルの精度を向上させるとともに、より長い時間スケールの計算を実行する必要があると考えられる。図-12(b)には、同じ時刻における流速ベクトルを示す。遊水室内では、低塩分水塊が存在する領域内では鉛直混合が生じているが、その下方の塩分が高い領域との間には明確な差異が見られ、塩分成層が解消できていないことがわかる。下部通水部の流況を見れば、遊水室内から沖側へ流れていることがわかるが、一周期を通してみれば下部通水部における流量はバランスがとれているものと考えられる。

以上のように、ここで開発した数値モデルでは、提案する鉛直循環流誘起堤体の密度成層場におけるその鉛直

混合効果を十分には再現することができなかった。今後は、Boussinesq 近似を用いることの妥当性を含めて、更なるモデルの改良に取り組みたい。

5. 結 言

本研究は、底層部の水質・底質環境の改善を目的として開発された鉛直循環流誘起堤体を対象として、密度成層場におけるその効果について検討したものである。得られた結論を要約すると以下のようなものである。

(1) 数値モデルによる温度成層場における鉛直循環流誘起堤体の効果の検討結果によれば、温度差が 5°C 程度であればその効果はほとんど低下することなく、所期の効果が期待できるものと考えられる。

(2) 水理模型実験によれば、 20% 程度の塩分成層が存在しても、鉛直循環流誘起堤体の前面における塩分成層は解消できることが確認された。

(3) 塩分成層場における鉛直循環流誘起堤体の効果を検討するために開発した数値モデルでは、定性的な傾向は再現できているが、定量的な検討を行うためには、モデルの改良が必要であることが確認された。

参 考 文 献

- 重松孝昌・小田一紀・池田憲造・藤田 孝 (2002): 底質環境の改善を目的とした鉛直循環流誘起堤体の開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 806-810.
- Lin, P. and P. L-F. Liu (1998): A numerical study of breaking waves in the surf zone, J. Fluid Mech., Vol. 359, pp. 239-264.