

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

NUMERICAL SIMULATION ON CONTROLLING SALT WATER INTRUSION BY FIXED STRUCTURES

工藤 拓也¹・木村 一郎²・清水 康行³・安田 浩保⁴・清治 真人⁵
Takuya KUDO, Ichiro KIMURA, Yasuyuki SHIMIZU, Hiroyasu YASUDA and Masato SEIJI

¹学生員 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 工博 北海道大学大学院准教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 工博 北海道大学大学院教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁴正会員 工博 独立行政法人寒地土木研究所 研究員 (〒060-0569 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

⁵正会員 財団法人北海道科学技術総合振興センター (〒100-0005 東京都千代田区丸の内3-2-2)

In the Lake Abashiri in Hokkaido, the inflow of saline water from the Sea of Okhotsk through the Abashiri River sometimes causes blue tides which seriously damage animals and plants. The aim of this paper is finding new simple and economic method to control salinity intrusion. In order to mix the dense saline water with pure water, we tried to introduce multiple flow control blocks, which form impinging-shear-layer instability and may enhance the mixing effectively. We used 3D numerical turbulence model in a density current to clarify the phenomena. First, we applied the numerical models to the flow with a permeable block and turbulence model was tuned through the comparison with the experiment. We applied 0-equation model and 2-equation models as a 3D turbulence model. Then the model was applied to the flow with impermeable blocks. We consider numerically the effect of distance and number of blocks feedback effects of impinging shear layers.

Key Words : Salinity Intrusion, 3D turbulence flow, Brackish Lake, Flow control block

1. はじめに

北海道東部に位置する網走湖はオホーツク海に注ぐ網走川下流部に位置する汽水湖であり、湖内は塩水層と淡水層の明確な二層構造となっている。近年、塩水遡上による塩分の流入により湖内の塩淡水境界層は上昇傾向にあり、それに伴って貧酸素状態の塩水層による青潮などの漁業被害も増加している。平成17年度より、網走川下流部に実験施設として仮設の可動堰を設置し、塩水遡上の制御効果を把握するための現地実験が行われている。しかしながら可動堰は電力エネルギーを消費し、メンテナンスが面倒であること、逆流時に河道を封鎖すればワカサギの遡上など、生態系に大きな影響を与える可能性があることなど、実用化に向けては多くの課題が残っている。そこで、本研究では、数値計算を用いて固定型の流況制御ブロック適用の可能性とその効果について検討を

行う。塩水遡上の制御に関しては有田ら¹⁾、小松ら²⁾が汽水流動場に堰を設けた場合の効果について実験を行っており、また、吉川ら³⁾は、鮭類捕獲施設である「やな」に着目した透過性構造物による実験的、数値解析的検討を行っている。さらに、木村ら⁴⁾は小松らの提案による1/4球型の流況制御ブロックを用いた制御について実験、数値解析を行っている。しかし、どれも未だ実用化には至っていない。

本研究では構造物の配置間隔によって、乱れがフィードバックする現象に着目し、この効果が卓越する配置方法について数値解析的に検討を行った。Rockwell⁵⁾らは一般的な流れの剥離とその衝突が生じる場合、2つの構造物の間隔によってfeedbackループが形成され、乱れが増幅する条件が存在するというを示している。また、この理論を応用し、Kimuraら⁶⁾やNakamuraら⁷⁾は適切な水制の間隔や、H鋼に与える風の影響について研究を行っている。しかし密度流に対してfeedbackループの研

究がなされた例はなく、もしこの理論が汽水流動場でも有効ならば、構造物周辺における鉛直方向の拡散を促すことによって、塩水の上流への進行を抑制する効果が期待できると考えられる。生態系への影響を最小限にし、さらに経済的に青潮被害を軽減することが出来る可能性があるという点で、実用可能性を検討することは意義があると考えられる。まずは、乱流モデルの検討として、吉川ら³⁾の実験との比較を通じてモデルの妥当性を検討した後、不透過構造物を連続的に配置し、その間隔を変化させることで塩淡水境界層や上流側の塩分濃度にどのような影響を与えるのか検証を行った。本来は、河川上流部にある湖内の塩淡水境界層の変化について考察するべきであるが、今回はその基礎的研究として河川内で生じる現象のみに着目して検討に留めた。

2. 数値解析モデルの概要

(1) 基礎式

本研究では、水面の移動とともに格子も移動する移動一般曲線座標系の基礎式である。また、Boussinesq近似を用いる。計算格子は Σ 座標的な扱いとするため、鉛直方向を z 方向に一致させる。基礎式の具体的な表記を次に示す。

[連続式]

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial V^i \sqrt{g}}{\partial \xi^i} = 0 \quad (1)$$

[運動方程式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial V^i}{\partial t} + \nabla_j [V^i (V^j - W^j)] + V^i \nabla_j W^j + V^j \nabla_j W^i \\ = \frac{\rho}{\rho_0} G^i - \frac{1}{\rho_0} g^{ij} \nabla_j p + \nabla_j \left[-\overline{v^i v^j} \right] + 2\nu \nabla_j e^{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

[密度輸送方程式]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_j [\rho (V^j - W^j)] + \rho \nabla_j W^j = \nabla_j \{ K_j g^{ij} \nabla_i \rho \} \quad (3)$$

ここに、 ξ^i : 計算空間の空間座標、 t : 時間、 V^j : 流速ベクトルの反変成分、 W^j : 格子移動速度ベクトルの反変成分、 v^j : 乱れ速度ベクトルの反変成分、 p : 圧力、 ν : 動粘性係数、 ρ : 流体の密度、 k : 乱れエネルギー、 ε : 乱れエネルギー散逸率、 G^j : 重力ベクトルの反変成分、 ρ_0 : 基準密度、 ν_t : 渦動粘性係数である。計量テンソル等は次式で表される。

$$g_{ij} = \frac{\partial x^k}{\partial \xi^i} \frac{\partial x^l}{\partial \xi^j} \delta_{kl}, \quad g^{ij} = \frac{\partial \xi^k}{\partial x^i} \frac{\partial \xi^l}{\partial x^j} \delta_{kl}, \quad g_{ij} g^{jk} = \delta_i^k \quad (4)$$

ここに、 x^i はデカルト座標系を表す。また、

$$g = \det[g_{ij}] \quad (5)$$

である。さらに、 ∇_j は共変微分を表し、例えば、あるベ

クトルの反変成分 A^k に関しては、次のようになる。

$$\nabla_i A^k = \partial A^k / \partial \xi^i + A^j \Gamma_{ij}^k \quad (6)$$

ここに、 Γ_{ij}^k はChristoffel 記号 (接続の係数) であり、次式で計算される。

$$\Gamma_{ij}^k = \left\{ \begin{matrix} k \\ ij \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} g^{km} \left(\frac{\partial g_{jm}}{\partial \xi^i} + \frac{\partial g_{im}}{\partial \xi^j} - \frac{\partial g_{ij}}{\partial \xi^m} \right) = \frac{\partial \xi^k}{\partial x^p} \frac{\partial^2 x^p}{\partial \xi^i \partial \xi^j} \quad (7)$$

なお、流速ベクトルの反変成分(V^k)と直交成分(U^k)は次の関係 (chain rule) により変換される。

$$V^i = (\partial \xi^i / \partial x^j) \cdot U^j, \quad U^i = (\partial x^i / \partial \xi^j) \cdot V^j \quad (8)$$

(2) 乱流モデル

流況制御ブロックによる塩水遡上の抑制効果を検討するためにはブロック周辺の乱流の再現が重要である。今回検討のために用いた乱流モデルはMunk & Andersonモデル、標準型k- ε モデル、二次非線形k- ε モデル、リチャードソン数を考慮した修正二次非線形k- ε モデルである。これらの乱流モデルの構成則を次に示す。

a) Munk & Andersonモデル

レイノルズ応力を次式で与える。

$$-\overline{v^i v^j} = \nu_t S^{ij} \quad (9)$$

鉛直方向の渦動拡散係数 K_z を、次のように与える。

$$\nu_z = \nu_{z0} (1 + aR_i)^\alpha, \quad K_z = K_{z0} (1 + bR_i)^\beta \quad (10)$$

ここに、 R_i はリチャードソン数であり、次式で表される。

$$R_i = -\frac{g}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^{-2} \quad (11)$$

ここに、 u はデカルト座標系での流速を用いて次式で示される。

$$u = \sqrt{U \cdot i^2} \quad (12)$$

また、 ν_{z0} 、 K_{z0} は密度勾配が無いときの値であり、次の値を用いた。

$$\nu_{z0} = K_{h0} = 1.0 \text{ cm}^2/\text{s} \quad (13)$$

また、モデル定数については $a=10$ 、 $b=3.33$ 、 $\alpha=0.5$ 、 $\beta=1.5$ である⁸⁾。

b) 標準型k- ε モデル

レイノルズ応力を次式で与える。

$$-\overline{v^i v^j} = \nu_t S^{ij} - \frac{2}{3} k g^{ij}, \quad \nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (14)$$

k 、 ε については次の輸送方程式より求める。

[k- ε 方程式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \nabla_j [k (V^j - W^j)] + k \nabla_j W^j \\ = -g_{ij} \overline{v^i v^j} \nabla_j V^i - \varepsilon + G_k + \nabla_j \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) g^{ij} \nabla_i k \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla_j [\varepsilon (V^j - W^j)] + \varepsilon \nabla_j W^j = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{v^j v^j} \nabla_j V^i - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} G_k + \nabla_j \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) g^{ij} \nabla_i \varepsilon \right\} \quad (16)$$

ここで、浮力による k の生成項 G_k は次式で表される。

$$G_k = -G^i \frac{1}{\rho_0} \overline{v^j \rho'} - \overline{v^j \rho'} = a_t \frac{\partial \rho}{\partial x^j}, a_t = \frac{\nu_t}{\sigma_t} \quad (17)$$

モデル定数として、 $C_{\varepsilon 1}=C_{\varepsilon 3}=1.44$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $\sigma_t=1.0$ を用いる⁹⁾。

c) 非線形k- ε モデル

二次非線形k- ε モデルの一般曲線座標系における構成則を次に示す。

$$-\overline{v^i v^j} = \nu_t S^{ij} - \frac{2}{3} k g^{ij} - \frac{k}{\varepsilon} \nu_t [\alpha_1 Q_1 + \alpha_2 Q_2 + \alpha_3 Q_3] \quad (18)$$

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (19)$$

$$Q_1 = S^{ia} g_{ai} \Omega^{ij} + S^{j\beta} g_{\beta i} \Omega^{ji} \quad (20)$$

$$Q_2 = S^{ia} g_{ai} S^{lj} - S^{ka} g_{am} S^{m\beta} g_{\beta k} \delta_l^i g^{lj} / 3 \quad (21)$$

$$Q_3 = \Omega^{ia} g_{ai} \Omega^{lj} - \Omega^{ka} g_{am} \Omega^{m\beta} g_{\beta k} \delta_l^i g^{lj} / 3 \quad (22)$$

$$S^{ij} = g^{ja} \nabla_a V^i + g^{ia} \nabla_a V^j, \Omega^{ij} = g^{ja} \nabla_a V^i - g^{ia} \nabla_a V^j \quad (23)$$

モデル係数は、strainパラメータ S と、rotationパラメータ Ω の次のような関数で与える。

$$\alpha_1 = -0.1325 f_M, \alpha_2 = 0.0675 f_M, \alpha_3 = -0.0675 f_M \quad (24)$$

$$f_M = (1 + m_{ds} S^2 + m_{d\Omega} \Omega^2)^{-1} \quad (25)$$

$$C_\mu = c_{\mu 0} (1 + c_{ns} S^2 + c_{n\Omega} \Omega^2) / D_\mu \quad (26)$$

$$D_\mu = 1 + c_{ds} S^2 + c_{d\Omega} \Omega^2 + c_{ds\Omega} S\Omega + c_{ds1} S^4 + c_{d\Omega 1} \Omega^4 + c_{ds\Omega 1} S^2 \Omega^2 \quad (27)$$

$$S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} S^{ia} g_{ai} S^{j\beta} g_{\beta i}}, \Omega = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \Omega^{ia} g_{ai} \Omega^{j\beta} g_{\beta i}} \quad (28)$$

ここに、モデル定数としては、 $m_{ds}=m_{d\Omega}=0.01$, $c_{ns}=0.0028$, $c_{n\Omega}=0.007$, $c_{ds}=0.0085$, $c_{d\Omega}=0.004$, $c_{ds\Omega}=0.003$, $c_{ds1}=0.00005$, $c_{d\Omega 1}=0.00005$, $c_{ds\Omega 1}=0.00025$, $c_{\mu 0}=0.09$ を用いる。モデル関数や定数の同定については文献¹⁰⁾を参照されたい。

d) 修正非線形k- ε モデル

非線形k- ε モデルにおいて、Mizushimaら¹¹⁾による研究成果をもとに、リチャードソン数を考慮した渦動粘性係数は次のように与える。

$$\nu_t = C_\mu \frac{1}{1 + 2.5 Ri} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (29)$$

以上の乱流モデルの再現性を検討するため、次に実験結果との比較を行う。

3. 実験との比較による乱流モデルの検討

(1) 計算条件

各乱流モデルの特性を検討するため、吉川ら³⁾が行った実験と同条件で数値計算を行い、結果を比較する。実験に用いた水路は長さ9.2m、幅0.2m、高さ0.6mの直線水

表-1 塩水遡上実験の水利条件

上流からの淡水流量 $Q1$ [l/s]	0.20
下流からの塩水流量 $Q2$ [l/s]	0.37
塩分濃度 CL (psu)	27.0
実験前の初期水深(cm)	10.2

路であり、水路勾配は水平としている。水利条件は表-1に示す通りである。透過性構造物の条件は、設置しない場合、透過率79%と50%の「やな」を水路中央に設置した場合の3種類である。

数値解析では透過性構造物の影響を x 方向の抗力として与える。抗力係数は吉川ら³⁾が実験的に求めたものを用い、次のように表される。

$$F = \frac{1}{2} \rho \alpha C_D u |u|, \alpha = 1 - \frac{\gamma}{100}, C_D = 1.41 \quad (30)$$

ここに、 γ : 透過率 (%), C_D : 抗力係数である。

また、構造物がない場合の塩淡境界層の平均高さの実験値は約4cmであることから、これを下流からの塩水流入厚として用いる。計算格子は y 方向5cm、 z 方向は0.5cm、 x 方向については計算時間の短縮のため水路中心部の60格子は0.5cm、上流、下流側それぞれ30格子については等比級数的に格子幅を広げている。 z 方向については構造物の高さまでは固定格子、そこから水面までは水面振動に追従する移動格子とした。

(2) 実験結果との比較

図-1に実験結果と各乱流モデルの透過性構造物手前、背後の密度界面フロントの進行速度を実験値と共に示す。図中の凡例についてはmunk, ke, nlke, nlkeri, expがそれぞれMunk & Andersonモデル、標準型k- ε モデル、非線形k- ε モデル、修正非線形k- ε モデル、実験値を意味している。また、図-2は塩淡境界層の最大高さの比較である。塩淡境界層は構造物がない場合の実験値との比較から塩分濃度が2psuとなる高さとして定義した。また、図-3は透過率55%の場合の実験値、Munk & Andersonモデル、修正2次非線形モデルを用いた場合の構造物周辺でのフロントの様子をプロットしたグラフである。今回の条件では計算負荷が小さいMunk & Andersonモデルを用いても、構造物周辺のような局所的な渦の巻き上がりや再付着に対してある程度の精度が確認されている修正2次非線形モデルはほぼ同様な結果が得られることから次章のブロック間隔の検討についてはこのモデルを採用することとした。

a) 塩淡境界層の高さの比較

図-2より、Munk & Andersonモデルでは、巻き上げの大きさが比較的小さく境界面の最大高さが実験値に比べて小さいことがわかる。標準型k- ε モデルの場合は巻き上げによる局所的な境界面上昇よりも下流から上流へ遡上する際の鉛直方向への拡散による境界面高さの変化のほうが大きい。したがって図-2の境界面最大高さは他

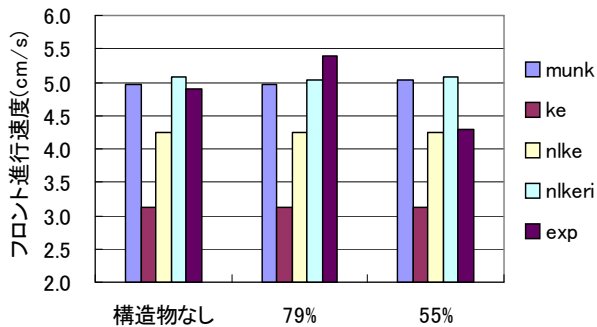
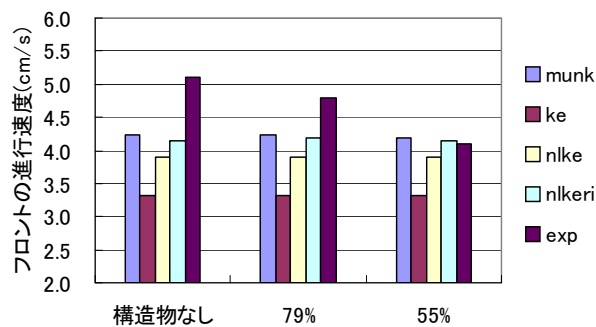


図-1 フロント進行速度の比較 (左: 構造物手前, 右: 構造物背後)

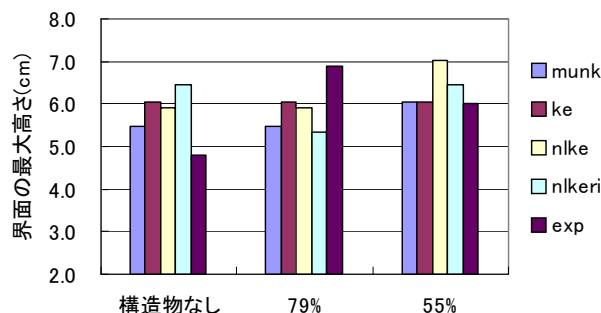


図-2 界面の最大高さの比較

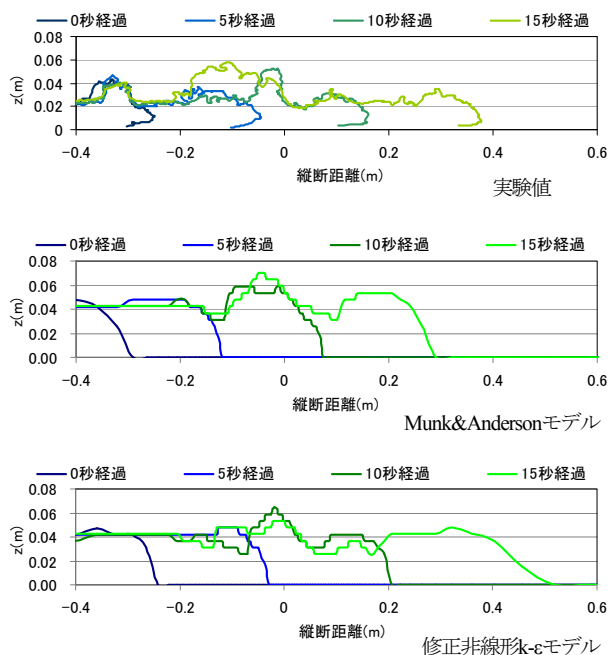


図-3 実験値と計算結果の比較

のモデルに比べて水路下流部において生じている。2次非線形k-εモデルでは、標準型に比べて下流部における鉛直方向の拡散が抑えられており、より再現性は向上している。

修正2次非線形k-εモデルでは2次非線形k-εモデルよりも巻上げが小さくなるということがわかる。実験では透過率55%よりも79%の方が巻き上げが大きいという結果が得られているが、数値解析では透過率が小さいほど巻

表-2 計算ケース名とブロックの間隔

Run	間隔 (mm)	Run	間隔 (mm)	Run	間隔 (mm)
Run1	5	Run5	45	Run9	85
Run2	15	Run6	55	Run10	95
Run3	25	Run7	65	Run11	105
Run4	35	Run8	75	Run12	115

き上げも大きく、塩淡水境界層も上昇する結果となった。これらの違いの要因として、数値計算では透過性構造物を抗力係数を用いた抗力として扱ったことが考えられる。このような複雑な流れにおける透過性構造物のモデル化については今後検討を要する。

b) フロントの進行速度の比較

Munk & Andersonモデルを用いた場合は、概ね実験値に近い進行速度が得られたが、透過率による速度の違いは大きいとはいえない結果となった。また、標準型k-εモデルは前節で述べた理由からどのケースも構造物の周辺での速度の変化ほとんどなく、流速も実験値よりも小さい。2次非線形k-εモデルと修正2次非線形モデルでは、いずれも構造物後方でフロントの進行速度が増加するという結果をよく再現している。

数値解析では下流側の塩水流入の条件を構造物がない場合の境界面高さの平均値(4cm)を用いているため下流部の流況が異なっている。今回の計算結果では2psuを塩淡水境界層としたが、実験では画像処理によって境界層を求めている。この位置と濃度分布との関係は今後検討を要する。

4. 構造物の連続的配置に関する検討

(1) 研究の背景

Rockwellら⁹⁾はある流れに対し剥離せん断層が発生し、さらにそれが下流側の構造物に衝突するとき、せん断不安定による渦構造がfeedback効果によって支配され、ある条件の下で共鳴して増幅されることを理論的、実験的に示している。また、このようなRockwellらの理論は風によるH型断面鋼が受ける応力の研究⁷⁾などにも考慮されている。密度流においてRockwellらの理論はあまり例が見当たらない。そこで、まず衝突間隔(ブロック間

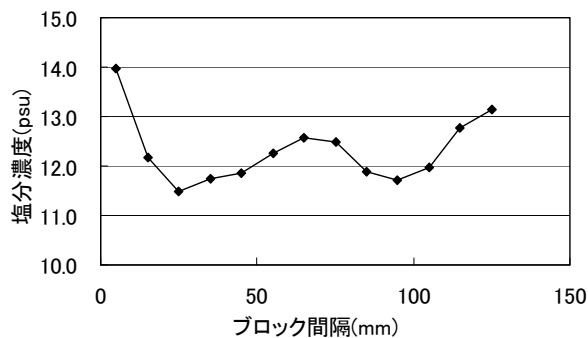


図-4 ブロックの間隔と下流の塩分濃度の関係

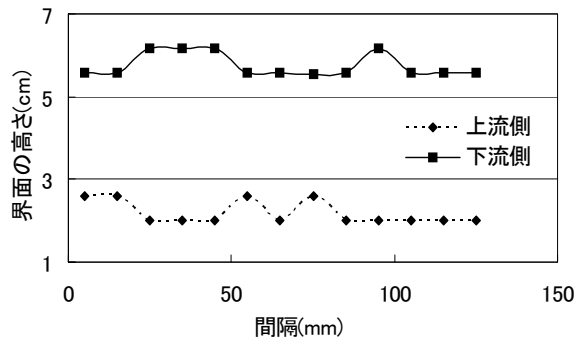


図-5 ブロック間隔と塩淡境界層の比較

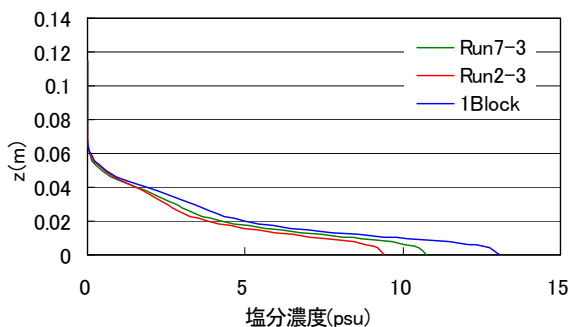
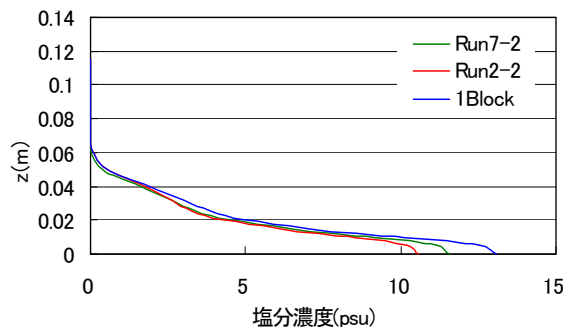


図-6 ブロックの配置間隔による濃度分布の違い

隔)を種々変化させた2個のブロックを設置したケースで数値解析を行い、塩分濃度の変化を検討することとした。

(2) 2つの構造物を配置した場合

a) 計算条件

水理条件、計算条件は前章における検討に用いた条件と同様である。ブロックは高さ2cm、幅2cm、奥行き20cmの直方体を仮定した。構造物の間隔は表-2の通り変化させ、12ケースの数値解析を行った。また構造物は水路中心部に対して対称となるように配置した。座標軸は水路中心を $x=0$ とし、上流側(淡水流入側)を正としている。

b) 計算結果

図-4は各ケース $x=0.78m$ での通水開始から120秒後の底面における塩分濃度とブロックの間隔の関係を表したグラフである。120秒後にはどのケースでも塩水は十分上流に達し、安定していることを確認している。図より構造物の個数は同じでもその間隔が異なることによって下流部における塩分濃度を変化させることがわかる。これは、乱れを増幅させるのに適したブロック間隔が存在し、それによって拡散したことでフロントの進行に遅れが生じ、上流側の塩分濃度を変化させたと考えられる。また、ブロックの間隔が25mm、95mmで2回極小値をもっていることがわかり、複数のモードが存在するというRockwellらの理論とも合致している。しかし、現在のところ、具体的なfeedbackループのメカニズムまでは解明できておらず、この点は今後の課題である。図-5は、ブロックの上流側($x=0.78m$)と下流側($x=-0.78$)における120

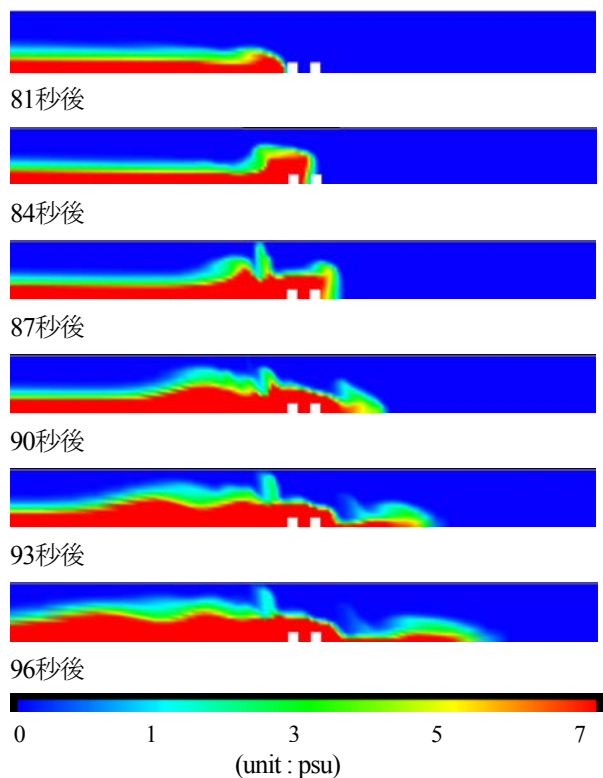
秒後の塩淡境界層高さ(図-5)とブロック間隔の関係を表したグラフである。ブロックの間隔が塩淡境界層高さに与える影響はほとんどないが、全てのケースにおいて、塩水流入厚に対して構造物上流で40%ほど境界層の高さが減少していることがわかる。網走湖においては青潮の抑制のために塩淡混合層の界面高さを下げる必要性が強く指摘されている。今回は河川部のみを対象とした検討を行ったが、今後上流側に湖が存在する場合、湖内の境界層高さへ及ぼす影響について検討を進めていく必要がある。

(3) 3つの構造物を配置した場合

塩分濃度の抑制効果が大きかったRun2の条件に、構造物を同じ間隔でさらに1つ加えて数値解析を行った。比較のために抑制効果が小さかったRun7の条件についても同様に行った。

a) 実験結果

図-6はブロック2個の場合と3個の場合で、ブロック上流部($x=0.78m$)の底面の塩分濃度が5(psu)を越えてから5秒後の鉛直方向の濃度分布である。5秒後としたのは構造物の数を増やすことによって生じる時間遅れを考慮したためである。また、グラフ中の-2、-3は構造物の個数を意味している。また1Blockは比較のため、ブロックが1個とした場合の結果である。図より構造物の個数を増やすことによって下流部の塩分濃度が低下していることがわかる。また、抑制効果が大きかった間隔では、さらに個数増やすことによって下流部の塩分濃度はより大きく低下していることがわかる。図-7は構造物が1個の場



合と2個の場合の流況を比較したものである。フロントが構造物に衝突する直前を基準に3秒毎の図である。ブロック数を2とした方より高い巻き上がりが生じ、混合が進行する様子が捉えられている。

5. まとめ

本研究は、流況制御ブロックによる塩水遡上の制御効果を数値シミュレーションを用いて検証したものである。まず、乱流モデルの同定を行うため、吉川らによる透過性構造物による実験との比較を行い、各モデルの再現性を確かめた。次に、不透過性構造物の配置間隔、配置個数と塩水遡上の抑制効果についての検討を行った。主な結果は次の通りである。

- 1) 浮力を考慮した2次非線形 $k-\epsilon$ モデル、さらにリチャードソン数を考慮した修正2次非線形 $k-\epsilon$ モデルを用いることで、フロント進行速度や塩淡水境界層高さは概ね実験値に近い値をとることがわかった。
- 2) 構造物の個数は同じでもその配置間隔を変化させることで下流部の塩分濃度に影響を与えることが示された。これは、feedbackループの形成によるものと考えられる。
- 3) 密度混合抑制効果が大きい配置間隔を保ってブロックの個数をさらに増やすことで更に大きな濃度抑制効果が示された。

本研究では実験との比較は透過性構造物を対象とした実験のみであり、ブロックの間隔による共鳴効果については定性的な検討に留まっているため実用化に向けてはまだ検討すべき点が多い。今後さらに多くの条件のもと

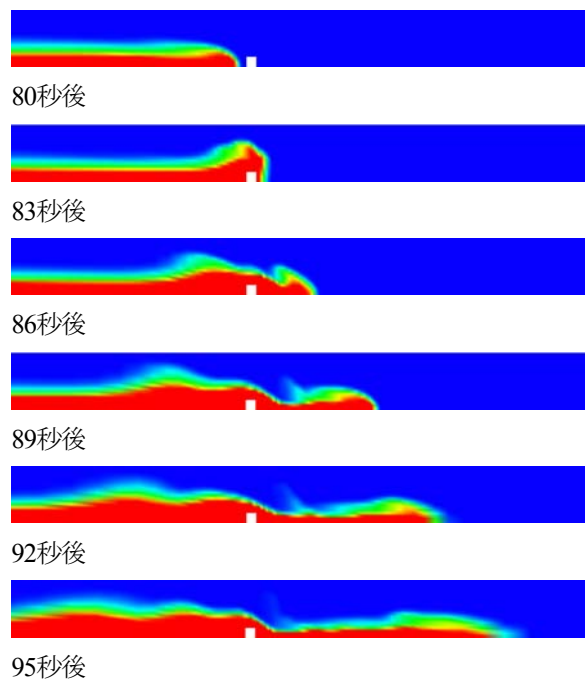


図-7 ブロックの個数の違いによる流況の時間変化

で実験との比較を行い密度流の制御に向けての検討を行っていきたい。

参考文献

- 1) 有田正光, 古谷智史 : 塩水遡上防止法に関する研究, 水工学論文集, 第40巻, pp.511-516, 1996.
- 2) 小松利光, 孫双科, 安達貴浩, 川上義幸, 米須清彦: 感潮河川における塩水遡上の人工的制御法についての研究, 水工学論文集, 第40巻, pp.517-524, 1996.
- 3) 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効果についての研究, 寒地土木研究所月報, No657, pp.2-14, 2008
- 4) 木村一郎, 寺本敦子, 小畑めぐみ, 細田尚: 連結系汽水湖に遡上する高塩分水塊の挙動とその制御に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第50巻, 2005.
- 5) D.Rockwell, E.Naudascher: Review - Self-Sustaining Oscillations of flow past cavities, Transactions of the ASME. Vol.100, pp.152-165, 1978.
- 6) I.Kimura, T.Hosoda, S.Onda, A. Tominaga : Computations of 3D turbulent flow structures around submerged spur dikes under various hydraulic conditions, River Flow 2004 vol.1, pp.543-553, 2004
- 7) Nakamura, Y. Nakashima, M.: Vortex excitation of prisms with elongated rectangular, H cross-sections, J.Fluid Mech. Vol.163, pp.149-169, 1986.
- 8) Munk, W. H., and Anderson, E. R.: Notes on the theory of the thermocline, J. Mar. Res. Vol.3, pp.276-295, 1948.
- 9) 大宮司久明, 三宅裕, 吉澤徹-偏: 乱流の数値流体力学-モデルと計算法, 東京大学出版会, p402, 1998.
- 10) Hosoda, T., Ali, M. S. and Kimura, I.: A non-linear $k-\epsilon$ model to predict the spatial change of turbulent structures in large scale vortices, J. of Applied Mech., JSCE, Vol.10, pp.723-732, 2007.
- 11) Mizushima, T.Ogino, F., Ueda, H. and Komori, S.: Buoyancy effects on eddy diffusivities in thermally stratified flow in an open channel, Hemisphere Pub. Corp, Heat Transfer, pp.91-96, 1978.

(2008. 9. 30受付)