

## スルースゲートを用いた塩水遡上の制御に関する研究

A study on control of density current by using sluice gate

北海道大学工学部環境社会工学科シビルエンジニアリングコース	○学生員	初田 直彦	(Naohiko HATTA)
寒地土木研究所寒地河川チーム	研究員	正会員	赤堀 良介 (Ryosuke AKAHORI)
寒地土木研究所寒地河川チーム	研究員	正会員	吉川 泰弘 (Yasuhiro YOSHIKAWA)
北海道大学公共政策大学院	教授	フェロー	清水 康行 (Yasuyuki SHIMIZU)

## 1. はじめに

河川の河口付近では、海の潮位の変動によって塩水遡上が観察されることがあるが、河口付近に閉鎖性水域が存在する場合には、このような塩水が水域内で成層化し、上層が淡水、下層が塩水の明確な二層構造となる。気候変動などの要因で海水位の上昇や河川流量の減少が生じた場合、塩水遡上量が増加することが予想されるが、その際に湖内の塩淡水境界線が上昇し、青潮などの漁業被害が発生しやすくなることが問題視されている。このため河川において塩水遡上をコントロールすることが、工学的に重要な課題となっている。現状では、河床に直接水理構造物を設置することで塩水遡上を抑制しているが、このような対策は、抑制効果についてはある程度期待できるものの、河床の環境に悪影響を及ぼす可能性が存在する。また、高度な制御を行うために起伏式などの可動型の構造物を設置した場合には、メンテナンスなど維持コストが大きくなるという問題が発生する。

このような問題に対し、本研究では、スルースゲートを用いた塩水遡上の制御手法を提案する。この手法では、水理構造物を河床に設置する必要がないことから、環境への負荷が小さく維持コストの縮減が期待されるほか、ゲート開度を自由に調節できるため、流入する塩水量や、流下する河川による塩水の連行現象のコントロールといった、より弾力的な制御を実現する可能性があると言える。

本研究で取り扱う対象は、淡水が順流状態にある開水路内に塩水が流入・遡上する状況に対して、スルースゲートが適用された流れ場である。現状ではスルースゲートを用いた塩水遡上の抑制効果や、このような条件下における水理現象そのものが十分に理解されていないことから、本研究では、提案する制御手法の実用化に向けて、ゲート周辺の流体现象の基礎的な知見を得ることを目的とする。研究手法として、塩水遡上を模した水路実験に対して Particle Image Velocimetry(PIV)法を適用し、流れ場の構造の把握を目指す。赤堀ら<sup>1)</sup>による同一の実験を対象とした研究においては、定常状態におけるゲート周辺の界面の挙動に関して密度 Froude 数や連行係数を用いて評価を行っているが、本研究では遡上塩水のゲート到達時の現象の解明に特化し、フロントに働く形状抵抗による抗力を中心に検討を行った。

## 2. 塩水遡上実験

## (1)水路実験の手法

実験水路の概要を図-1 に示す。図中左側が上流側、右側が下流側である。水路は河床および側面がアクリル板で構成されている。実験区間の水路長は 9.2m、幅は 0.2m であり、勾配は有していない。図-1 中、上流側、下流側のそれぞれで河床の勾配が平坦に変化する点を、上流端、下流端と定義する。スルースゲートは、水路下流端からの距離(ゲート下流側の側面までの距離)が 2.85m となるように設置された。実験では、最初に上流から淡水のみ供給し、定常状態となるまで水路内を循環させた後、下流端から塩水を供給することにより、塩水遡上を開始させた。

本研究では、実験時の流速分布の観測に際し、PIV 法を用いた。PIV 法は、トレーサー粒子によって可視化された時間的に連続する流れ場の画像に対し、二つの時刻間の相関をとることで、流れ場の瞬時・多点の速度情報を抽出する手法である。本研究では画像間の相関を求める際に、直接相互相関法を用いている。トレーサー粒子を可視化するためのレーザーシートは、水路下面から水路の鉛直縦断面に並行して照射された。シートの照射位置は、右岸から 0.05m の地点とした。

実験での主要な観測項目は、流体现象の PIV 計測を目的としたデジタル一眼レフカメラ(Canon 製 EOS 5D Mark-II)による動画撮影(30fps)である。密度流現象に対する PIV 計測の適用性例としては新谷ら<sup>2)</sup>による解析が挙げられ、その有効性が確認されている。PIV による測定領域は、ゲートを基準として上流側に 0.1m、下流側に 0.2m とする。撮影領域はこの測定領域を十分に含んだ領域とした。実験では、塩水、淡水ともに無着色とし、トレーサー粒子として比重が淡水と塩水の間位置するダイヤイオン HP20 を用いた。

## (2)実験条件

実験条件の設定に際し、塩水遡上が実際に起きている網走湖河口域での現象を対象とした吉川ら<sup>3)</sup>の室内実験の値を参考とした。内部 Froude 数に関する相似則を満足させるために、浮力加速度( $g' = \{(\rho_1 - \rho_2) / \rho_1\}g$ 、ここで  $\rho_1$ : 下層水の密度、 $\rho_2$ : 上層水の密度、 $g$ : 重力加速度)を現地と同等となるように、塩水の濃度を調整した。また内部の界面が不安定領域となるように流量を定めた。これら塩水遡上実験の水理条件を表-1 に示す。今回はスルースゲートの高さが現象に及ぼす影響を検討するものとし、スルースゲートの開口部の高さが 50%となるケース(case1)、および 25%となるケース(case2)の 2 ケースを設定した。

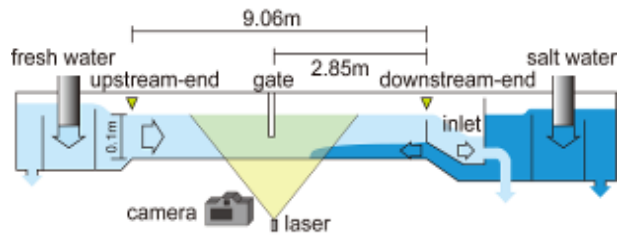


図-1 実験水路概要図

表-1 水理条件

上流からの淡水流量 $Q_1$ [m <sup>3</sup> /s]	0.0002
下流からの塩水流量 $Q_2$ [m <sup>3</sup> /s]	0.00037
塩分濃度 $C_L$ [psu]	25.6
水路幅[m]	0.2
水路勾配[%]	0
初期水深[m]	0.1

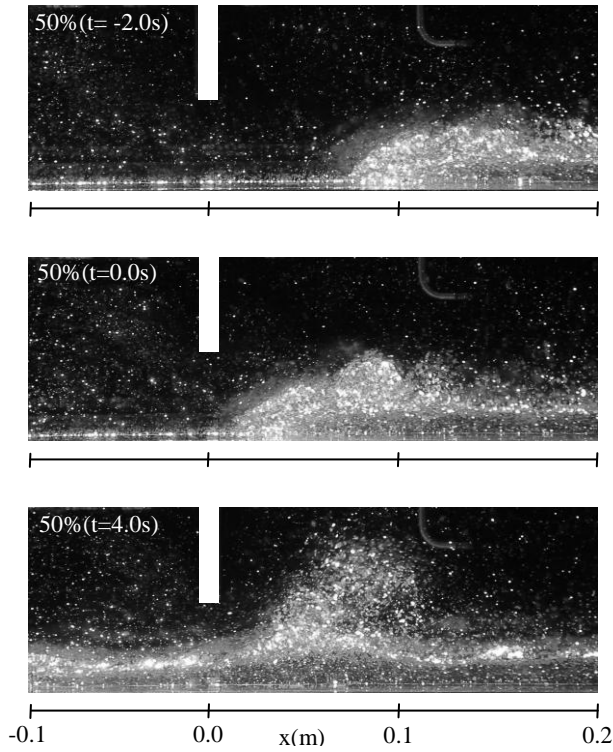


図-2 Case1 (開度 50%), ゲート周辺での密度界面

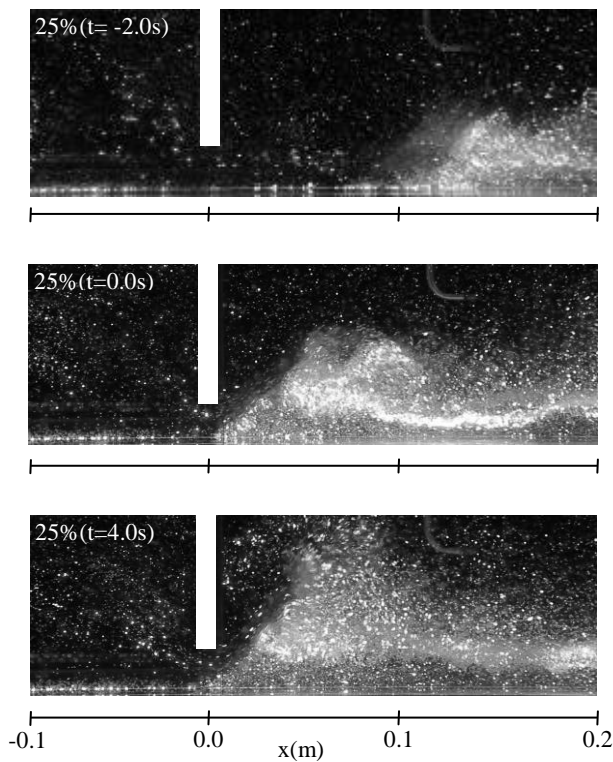


図-3 Case2 (開度 25%), ゲート周辺での密度界面

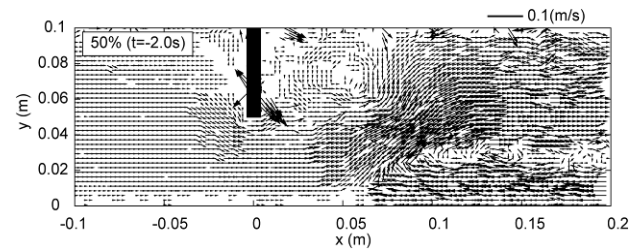


図-4 Case1 (開度 50%) における流下方向および鉛直方向成分の瞬間ベクトル

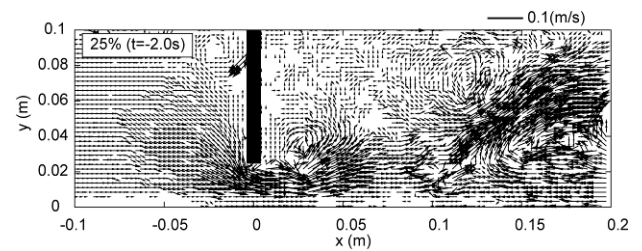


図-5 Case2 (開度 25%) における流下方向および鉛直方向成分の瞬間ベクトル

## 3. 実験結果

## (1)流況

図-2, 3 は, 密度フロントがゲートに侵入する前後の特徴的な瞬間像を動画から切り出したものである. それぞれ, Case1 (開度 50%), Case2 (開度 25%) を示す. ここで,  $x$  は  $x=0.0\text{m}$  をゲート中央直下とする流下方向距離,  $z$  は  $z=0.0\text{m}$  を水路床とする鉛直方向距離であり, 密度フロントがゲート直下に到達した時間を  $t=0.0\text{s}$  としている. 図-2, 3 より, Case1(開度 50%)では密度フロントがスルースゲート上流側に侵入し, 上流側下層に塩水層を形成している一方, Case2(開度 25%)では密度フロントのゲート上流への侵入が完全に阻止されていることが確認される. 各ケース  $t=4.0\text{s}$  においては, ゲートの下流側近傍で界面が大きな勾配を有し, 平坦な界面へと移行する箇所において強い剥離渦を生じている. このとき Case1 ではゲート上流側での塩水層厚が一定であるのに対し, 下流側では時間が進むにつれて層厚が大きくなっていることが確認される. Case2 においても, 侵入が抑制された下流側の塩水層厚が時間の経過につれて増大している. 図-4, 5 は図-2, 3 に対応する流れ場に対し, PIV 計測によって得られた流速のベクトル図であり, 流速の流下方向と鉛直方向成分を示す. 図-4, 5 より, Case2(開度 25%)では, Case1(開度 25%)よりもゲート下の流速が大きく, 上層水の吹き上げ角度が急であることが分かる. これによりゲート下流側で吹き上げられた塩水がより水面に近い位置まで到達していることが確認される. また, ベクトル図からも, Case2 において密度フロントの侵入がスルースゲート下で阻止されていることが確認できる.

## (2)密度フロント

ここでは密度フロント周辺での抗力を算定することで, Case2で確認されたゲート下でのフロント侵入の抑制に関して検討を行う.

吉川ら<sup>3)</sup>は密度フロントの侵入を1次元数値計算モデルで検討する際に, 運動方程式中に式(1)で定義された形状抵抗による抗力の項である  $I_{f1}$  を導入し, その影響が計算精度に大きく影響することを示した.

$$I_{f1} = -\frac{if_f}{2gh_1} \frac{\Delta h_1}{\Delta x} (U_2 - U_1) |U_2 - U_1| \quad (1)$$

ここで  $if_f$ :実験から得られる密度フロントの形状抵抗係数,  $\Delta h_1/\Delta x$ :局所的な勾配,  $h_1$ :界面の局所的勾配を得た箇所でのフロント層厚,  $U_1-U_2$ :フロント界面における相対速度である. 添字は 1 が密度フロントを形成する塩水層, 2 がフロントの十分上流の淡水層の領域を示す.

式(1)において時間的に大きく変動する値は層厚 ( $\Delta h_1$ ) と相対流速 ( $U_1-U_2$ ) であることから, ここでは実験結果における両者の変動に着目した.

実験結果における  $u_1$ ,  $u_2$  を, それぞれ移動する密度フロントの先端から流下方向へ  $0.025\text{m}$  および  $-0.025\text{m}$  離れた地点での流下方向流速の鉛直方向分布とし,  $u_1$  が密度フロントの上流側への進行速度,  $u_2$  が淡水領域の流下速度を代表する分布とする.

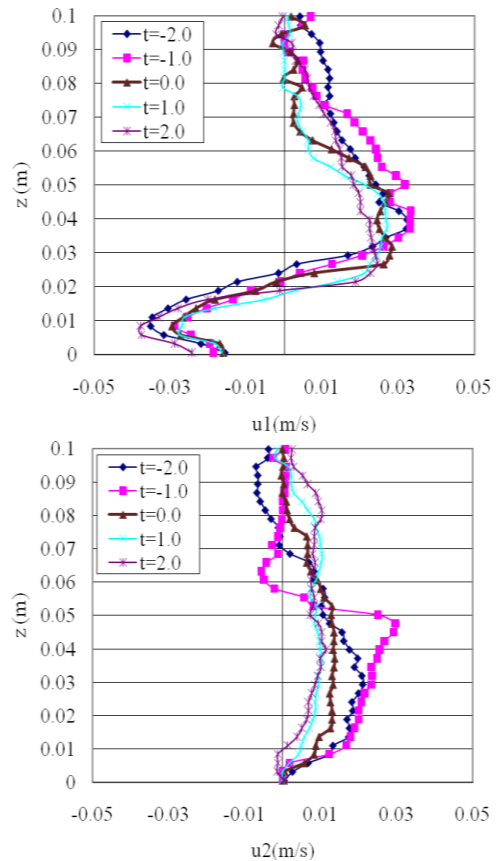


図-6 Case1 (開度 50%)における流下方向流速の鉛直分布

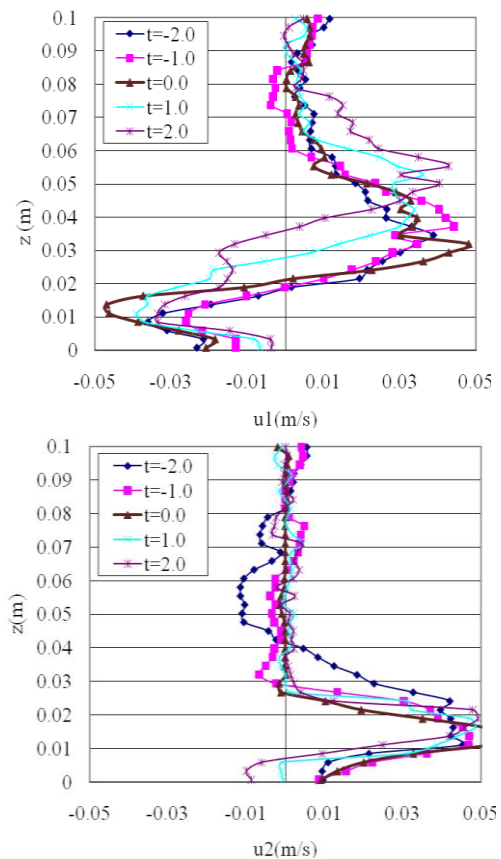


図-7 Case2 (開度 25%)における流下方向流速の鉛直分布



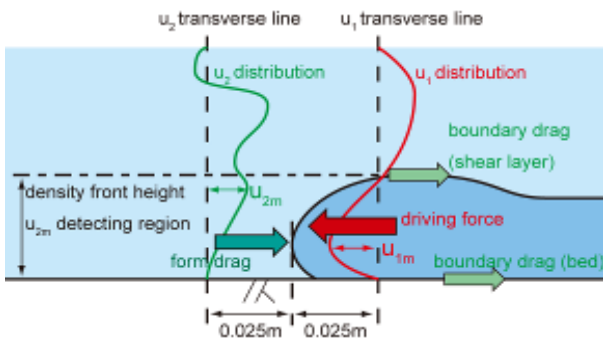
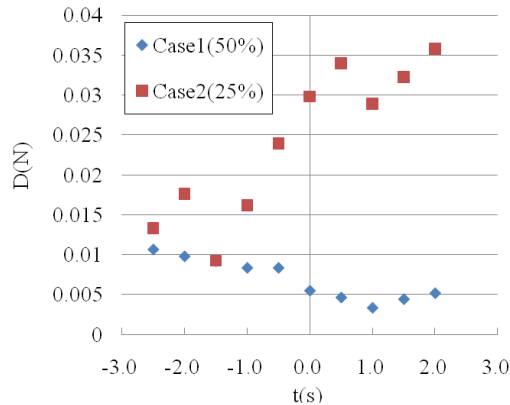

 図-8 フロント周辺の力と  $u_{1m}$ ,  $u_{2m}$  の定義


図-9 形状抵抗力の時間変化

図-6, 7 は PIV 計測から得られた  $u_1$ ,  $u_2$  の鉛直方向分布を示したものである。密度フロントがゲートに到達する時刻 ( $t=0.0s$ ) の前後の時間帯から代表的な時間帯を抽出し、1s 間の時間平均値を図示した。図中の時刻は各時間帯の中間値を表す。以降、図-6, 7 における流速の変曲点から  $z=0.0$  までの距離をフロントを構成する塩水層の層厚とみなす。また  $u_1$  のグラフにおける最小値を密度フロントの進行速度  $u_{1m}$ ,  $u_2$  のグラフにおける、フロント層厚以下の高さにおける最大値を  $u_{2m}$  とする (図-8)。図-6 より Case1 (開度 50%) の  $u_1$  では、密度フロントのゲート通過後に層厚が低下していることが確認されるが、比較的、時間的に一様な分布を示している。一方で、図-7 の Case2 (開度 25%) の  $u_1$  の場合は、ゲート下で密度フロントの進行が完全に抑制されるため、押し留められた流入塩水により  $t=0.0s$  以降に急速に層厚が増大している。また Case1 の  $u_2$  に関しては、 $t=-1.0s$  程度で  $u_2$  の測線がゲートを通過していると考えられるが、この前後で分布の傾向が異なり、ゲート通過以降の時刻 (ゲートの上流側に測線が存在) では、鉛直方向に一様で流速の遅い分布が存在するのみであるのに対し、通過前 (ゲート下流側に測線が存在) においてはやや強い流速 (0.03m/s) がゲート開口部の比較的上部 ( $z=0.03 \sim 0.05m$ ) に分布する傾向が見られる。ただし、フロント層厚は 0.02m 前後に限定されるため、 $u_2$  の最大値の存在域は  $u_{2m}$  の定義域 (底面からフロント層厚の高さまで) から外れており、このためゲート通過前の状態においても  $u_{2m}$  の値は  $u_2$  の最大値よりも低い値を取る。また、一方で Case2 の  $u_2$  は  $t=0.0s$  に向けて (フロントがゲートに近づくのに応じて) 分布の形状が鋭くなり、その位置も底

面近傍の低い位置 ( $z=0.0 \sim 0.025m$ ) に存在することから、 $u_2$  の最大値は  $u_{2m}$  の定義域内にあり、その値も大きい (0.05m/s)。このように、 $u_2$  の分布傾向および絶対的な流速の違いにより、フロントの相対流速 ( $u_{2m}-u_{1m}$ ) が Case2 においてより大きくなることが示された。

次に、上で得られた  $u_{1m}$ ,  $u_{2m}$ , フロント層厚の値から、形状抵抗による抗力の時間的変動を算定する。形状抵抗による抗力  $D$  は式(2)によって定義される。

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D \quad (2)$$

ここで  $\rho$ : 密度,  $V$ : 相対流速 ( $V=|u_{2m}-u_{1m}|$ ),  $A$ : 投影面積,  $C_D$ : 抗力係数を示す。投影面積  $A$  は水路幅 (0.2m) にフロントの塩水層の層厚を乗じたものである。また抗力係数  $C_D$  は吉川ら<sup>3)</sup>の  $C_D=1.41$  とする。密度フロントがゲート上流側へ流入する前後の Case1 (開度 50%) と Case2 (開度 25%) の形状抵抗による抗力の時間変化を図-9 に示す。図-9 から Case1 において形状抵抗の抗力  $D$  は時間的に増加傾向を示さず、ゲート通過後にむしろ低下するのに対し、Case2 においては、ゲート到達 ( $t=0.0s$ ) に向けて急速に増加し、その後もほぼ一定の値を示すことが分かる。図-6, 7 に示された結果との比較から、Case2 においてはゲート付近での淡水が底面近傍で強い流下方向流速を有しており、このためにフロントの相対速度が大きく、結果として形状抵抗による抗力が十分に発達したことが推測される。また、このことが Case2 においてフロントの進行がゲート下で抑制された要因であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、塩水遡上を抑制する手法としてスルースゲートを用いた手法を提案し、室内実験によりその特性の検討を行った。実験結果より、ゲート開度を 25% に設定した場合は塩水の遡上が完全に抑制されることが確認された。また、開度 25% のケースでは、ゲート付近の淡水の流下速度が底面近傍で大きくなることから、フロントの相対速度が増加することが確認された。このため、形状抵抗による抗力が増し、密度フロントの進行を抑制していることが確認された。

#### 参考文献

- 1) 赤堀良介, 吉川泰弘, 安田浩保: スルースゲートを用いた弾力的な塩水遡上の制御手法に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第 55 巻, 2011 (in print).
- 2) 新谷哲也, 梅山元彦: PIV 法と画像処理を用いた成層水中の流動・混合解析, 水工学論文集, 第 48 巻, pp. 1381-1386, 2004.
- 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抑制効果についての研究, 寒地土木研究所月報, No. 657, pp. 2-14, 2008.