

格子状構造物の塩水遡上速度への影響

IMPACT OF A MESH STRUCTURE ON SALINITY INTRUSION

吉川 泰弘¹・安田 浩保²・渡邊 康玄²

Yasuhiro YOSHIKAWA, Hiroyasu YASUDA, Yasuharu WATANABE

¹ 正会員 工修 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

² 正会員 工博 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

The ecosystem in the tidal region of a river tends to be diverse because of seawater intrusion. Such an ecosystem is observed in the Abashiri River in eastern Hokkaido. The downstream end of Lake Abashiri is about 7 kilometers from the Abashiri river mouth. The lower layer of the lake is saline water that has flowed upstream from the sea. Dissolved nutrient salts from the saline water layer make the lake a good fishing ground. However, in recent years, the damage to fishery of blue tide happens frequently because the fresh water depth of the lake became shallow. One solution is based on the comb-shaped weir traps that are used for catching fish in Abashiri River. Mesh structures that simulate weir traps were used in laboratory experiments to study the relationship between mesh porosity and salinity intrusion velocity. The following findings were obtained: The salinity intrusion experiment showed that when the mesh porosity is low, the flow velocity decreases before the water reaches the structure, and that the flow velocity does not differ greatly between before and after passing through the structure.

Key Words : Mesh Structur, Salinity Intrusion Velocity, Interface, Experiment

1. はじめに

河川の感潮域では、塩水が河川を往来する事によって多様な生態系を形成している。北海道東部に位置する網走川もその1つであり、網走川は河口から約7kmの位置に網走湖を有している。網走川および網走湖を図-1に示す。網走湖の下層は、塩水が網走川を通り流入¹⁾するため塩水層となっており、上層の淡水層は塩水層からの栄養塩の溶解もあいまってシジミ、ワカサギなどの良好な漁場となっている。しかし近年、塩水層は長年の人工・自然汚濁負荷が流入貯留され、細菌等により酸素が消費され無酸素状態となっており、また塩水量が増加傾向にあり青潮などの漁業被害の危険性が高くなっている。このため、網走川では塩水遡上の抑制に対する様々な取り組みが継続的に行われている。そのうちの一つに、鮭類の捕獲を目的として設置されている「やな」を用いた抑制の試みがある。従来までに、堰の設置²⁾や気泡を河川横断方向に噴射する³⁾ことにより塩水遡上を抑制する対策法が提案され、これらはいずれともに優れた効果を示すとされている。しかし、洪水時の安全性の確保、河川環境への負荷、装置の維持管理の面で懸念が残る。これに対し、「やな」を塩水遡上抑制のための透過性構造物と見なすこの対策法は、有力な代替案と言えよう。



図-1 網走川感潮区間の平面図

ただし、現時点では「やな」のような透過性構造物による塩水遡上の抑制効果はほとんど知られていない。しかも、透過性構造物が流れにおよぼす抗力は、この抑制効果に対して重要な意味を持つにもかかわらず、透過性構造物の抗力係数 C_D を定量的に示した文献は著者が見る限り存在しない。そこで、本研究では、この抑制効果の解明の第一段階として以下を行った。まず、抗力測定実験より透過性構造物の抗力係数を測定し、つぎに、塩水遡上実験より構造物が存在する場合の塩水遡上速度を計測して挙動特性について考察した。

表-1 抗力測定実験の水力条件と水路の粗度係数

	Q [m ³ /s]	H [m]	Re'	N
CASE 1	0.045	0.096	4.5×10^4	0.0193
CASE 2	0.071	0.124	7.1×10^4	0.0202
CASE 3	0.105	0.152	10.4×10^4	0.0200
CASE 4	0.146	0.183	14.6×10^4	0.0181

Q：流量，H：水深，Re'：レイノルズ数 ($=UH/\nu$)

N：マンニングの粗度係数，U：流速

ν ：動粘性係数 1.003×10^{-6} [m²/s] (水温 20 °C)

現地 Re'： $3.0 \times 10^4 \sim 299.1 \times 10^4$

2. 格子状構造物の抗力測定実験

網走川の透過性構造物「やな」は，横断面で厚さ 3.5mm の鋼板と直径 4.0mm の丸い鋼材が互い違いに組まれており形状が複雑であり，本研究では簡便のため通水孔が正方形である格子状構造物としている．本実験では，格子状構造物の特性を明らかにする事を目的に水力実験を行った．実験結果から通水率の異なる3つの格子状構造物の抗力係数についての検討を行った．本論文における通水率とは，大きいほど流水は流れやすく，小さいほど流水は流れにくい値であり，河川横断面積に対する通水孔面積の率 (%) である．

(1) 抗力測定実験の手法

実験水路はガラス水路 (長さ 25m × 幅 1m × 高さ 1m) を用い，水路底面に粗度を持たせるため人工芝 (TO グリーン P-100, (株) テラモト) を設置した．実験の測定区間は上下流の影響を除くため水路中央を中心に 10m とし，水路勾配は 1/500 として実験を行った．

a) 実験条件

実験の水力条件は，実験のレイノルズ数が現地のレイノルズ数の範囲となるように4ケース設定した．1ケースにつき構造物なし1回，構造物あり3回で計16回の実験を行った．表-1に水力条件と算出した水路の粗度係数を示す．現地のレイノルズ数 ($Re'=UH/\nu$) は，網走川下流において，水温 20 °C，水深 3m，流速 0.01～1.00m/s とすると， Re' は $3.0 \times 10^4 \sim 299.1 \times 10^4$ の範囲である．表-1より実験のレイノルズ数が現地のレイノルズ数の範囲である事が分かる．表-1の水深は縦断距離で2mピッチの測定値の平均値であり，流量の精度管理は±2%の範囲で行った．実験水路のマンニングの粗度係数は平均して0.0194であった．流速の測定機器は電磁流速計 (ACM300-A, アレック電子 (株)) を用いた．流速の測定箇所は水深方向に5点，横断方向に7測線の計35点とし，水深方向は1, 3, 5, 7, 9割水深で，横断方向は水路左側より2, 8, 15, 50, 85, 92, 98cmの箇所で測定した．

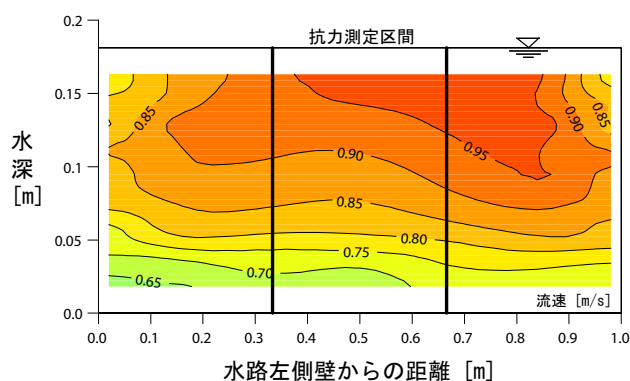


図-2 実験水路内の流速コンター図

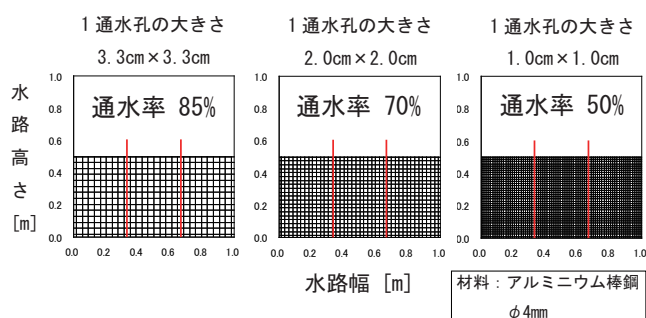


図-3 格子状構造物の緒元

b) 格子状構造物

図-2はCASE4の測定区間の下流端での流速のコンター図である．この図から流速が側壁の影響を受けることが見て取れる．格子状構造物の抗力測定は，水路側壁の影響を控除するために，格子状構造物を縦方向に3分割して，図-2の水路中央の位置で測定を行った．抗力の測定については，3分力計 (LMC-3502-10WP, 日章電気 (株)) を用いて，出力電圧と質量との関係式を事前に導き，出力電圧から流下方向の抗力を算出し測定値とした．

格子状構造物は通水率85%，70%，50%の3つの構造物を用いた．格子状構造物の緒元を図-3に示す．構造物の材料はアルミニウム棒鋼，直径 $d=0.004$ m であり，高さ5mの構造物を縦方向に3分割して水路内に設置した．1通水孔の大きさは，通水率85%で3.3cm × 3.3cm，通水率70%で2.0cm × 2.0cm および通水率50%で1.0cm × 1.0cm である．格子状構造物の縮尺は，現地 (通水率83%) と実験 (通水率85%) の1通水孔の面積から求めると1/3.6となる．

(2) 抗力測定実験の結果

a) 格子状構造物の抗力

複数の円柱で構成されている格子状構造物の抗力 D (測定値) と、単数の無限長さの円柱の抗力係数を用いた抗力 D' との比較を行い、格子状構造物が受ける抗力について検討を行う。抗力は次式により求めた。

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

D' [N] : 抗力, C_D : 抗力係数, ρ [kg/m³] : 流体密度, A' [m²] : 構造物の投影面積, U [m/s] : 構造物の直上流の流速である。 C_D は一般にレイノルズ数 ($Re=Ud/\nu$) と物体の形状により見積もることが出来る。今回の実験の Re は 300×10^3 以下であるため, C_D は単数の無限長さの円柱として 1.20 で固定した⁴⁾。 ρ は水温から算出し, U は格子状構造物から 12cm 上流の鉛直平均流速とした。

横軸に D' , 縦軸に測定値 D とした相関図を図-4 に示す。図-4 より, 格子状構造物の抗力 D は D' よりも大きな値となっており, 抗力が大きくなる程その差は広がっているのが分かる。水理条件は, 抗力が小さい方から CASE1, 2, 3, 4 の順番であり流速もこの順で速くなる。流速が速くなるにつれ, 複数の円柱の方が単数の円柱の場合に比べて wake (後流) による抗力が大きくなると推測できる。

図-4 より, 通水率 50 % は通水率 70 %, 80 % に比べて, D' と D の差が大きくなっている事が分かる。この理由として, 今回の実験では可視化出来なかったが wake の一部の現象であるカルマン渦が発生していると仮定した場合, カルマン渦の発生範囲は円柱の芯を中心として 0.52cm (=1.3d) であり, 通水率 50 % の 1 通水孔は 1.0cm $\times$ 1.0cm であるため, カルマン渦が重畳する事による抗力の増大のため, 通水率 50 % の D が大きくなったと推測できる。

いずれにしても今回の実験結果から, 単数の無限長さの円柱の C_D を用いて抗力を算出する場合, 格子状構造物の通水率が小さいほど抗力は小さく算出されると言える。今回の実験結果から, D と D' の関係を補正係数を用いて式 (2) で整理した。式 (2) より D' は実際の D よりも約 85 % 程度小さく算出されると分かる。

$$D = 1.18 D' \quad (2)$$

b) 各通水率の抗力係数

格子状構造物の通水率の相違による抗力係数 C_D の特性について検討を行う。実験結果を用いて C_D を式 (3) から求めて, レイノルズ数で整理したものを図-5 に示す。 D は測定した値を用いている。図-5 より, どの通水率でも C_D は 1.0 から 2.0 の範囲内に収まり, オー

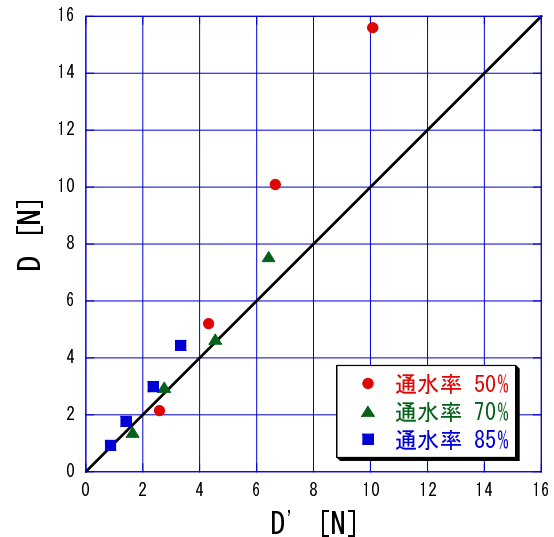


図-4 D' と D の相関図

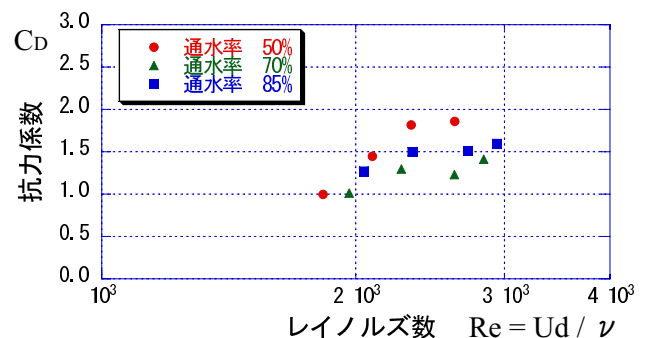


図-5 各通水率の C_D と Re の関係図

ダーは同程度であると言える。

$$C_D = \frac{2D}{\rho A' U^2} \quad (3)$$

c) 各通水率の流速の減衰率

通水率の違いによる流速の減衰率の相違について検討を行う。構造物の影響を受けない流速 U' はマンニングの平均流速とし, 構造物の影響を受けた流速 U は構造物の直上流の測定流速とした。流速の減衰率を $(U'-U)/U' \times 100$ で評価すると, 通水率 50 % で減衰率 23 %, 通水率 70 % で減衰率 10 %, 通水率 85 % で減衰率 5 % である。通水率 50 % で流速の減衰率が大きい事が分かる。今回の実験において, 通水率が小さいほど構造物の直前流速の減衰率が大きくなる事が分かり, 流速の減衰率を定量的に見積もる事が出来た。

d) 格子状構造物による縦断水位変化

格子状構造物の通水率の違いによる縦断水位の変化について検討を行う。CASE 3 において 5cm ピッチで測定した縦断水位を図-6 に示す。図-6 より, 格子状構

表-2 格子状構造物の損失水頭

通水率	50 %	70 %	85 %
損失水頭 [m]	0.025	0.020	0.005

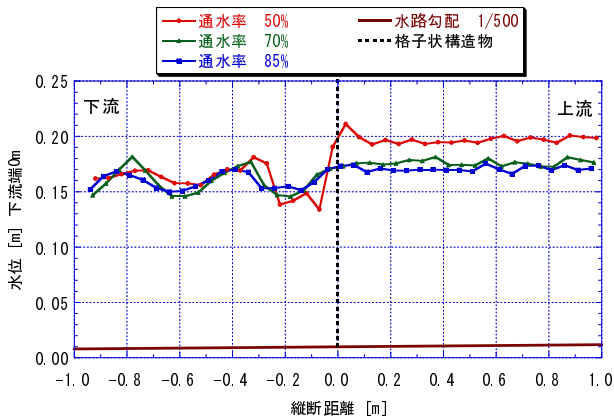


図-6 格子状構造物を設置した時の縦断水位 (CASE 3)

造物の上流で水位が上昇しているのが分かる。この理由として、通水率が小さいほど流速の減衰率が大きいため、流速が減速し水位が上昇したと推測できる。この水位の上昇は、ベルヌーイの定理から格子状構造物の損失水頭で評価できる。格子状構造物の損失水頭を表-2に示す。表-2より、損失水頭は通水率 50 %で 0.025、通水率 85 %で 0.005 である。通水率が小さいほど格子状構造物の損失水頭が大きくなり、格子状構造物の上流水位は上昇すると言える。

3. 格子状構造物の塩水遡上実験

本実験は、格子状構造物の通水率の違いによる塩水遡上のフロントの進入速度および淡水と塩水の界面の挙動の相違を明らかにする事を目的に実験を行った。

(1) 塩水遡上実験の手法

実験水路はアクリル水路 (水路長さ 9.2m × 幅 0.2m × 高さ 0.6m) を用いた。実験水路のマニングの粗度係数は 0.01 である。実験の測定区間は上下流の影響を除くため水路中央を中心に 1m とし、水路勾配は現地に合わせて水平とした。水路の縮尺は、現地と実験の水深比から 1/25 である。

塩水の着色料には青色のメチレンブルーを用いた。この着色した塩水を 24 時間放置した結果、着色料の沈殿はなかったため、今回の実験では着色された流体は塩水であると判断した。格子状構造物については通水率 79 %と通水率 55 %の 2 種類の市販の構造物を用いた。

塩水遡上実験の手順を図-7に示す。図-7から、最初に上流 (右側) から淡水のみを供給して、水深を一定と

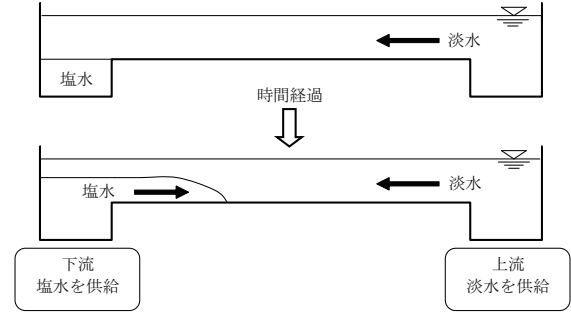


図-7 塩水遡上実験の手順

する定常状態とする。次に、下流 (左側) から塩水をある一定流量で供給すると徐々に塩水の水深が上昇し塩水が遡上するため、この状態で実験の開始とした。

a) 実験条件

実験は密度流であるため水理条件の設定においては、いくつかの条件を満たすように行っており詳細を記述する。実験における下層 (塩水) が受ける重力の大きさを、現地のそれと一致させた。その重力の大きさは ϵg であり、 ϵ は以下のように定義される。 $g[\text{m/s}^2]$ は重力加速度 9.8 である。

$$\epsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad (4)$$

$\rho[\text{g/cm}^3]$: 流体密度、添え字 1 は上層 (淡水), 2 は下層 (塩水) である。 ϵ を一致させる事により、フルード相似則を満たせば同時に内部フルード相似則を満たす事となる。現地の ϵ は 0.03584 であり、この ϵ の値で実験の密度を管理した。密度 ρ は次式の knudsen の式で与えられるものとし、実験では水温と塩分濃度を管理する事により密度を管理出来るものと判断した。 $T[^\circ\text{C}]$: 水温, $C_L[\text{psu}]$: 塩分濃度である。

$$\rho = \sigma_t / 1000 + 1$$

$$\sigma_t = \sum + (\sigma_0 + 0.1344) [1 - A_t + B_t (\sigma_0 - 0.1324)]$$

$$\sum = - \left[(T - 3.9)^2 (T + 283.0) \right] / \left[(503.570)^2 (T + 67.26) \right]$$

$$\sigma_0 = -0.069 + 1.4708 C_L$$

$$- 0.001570 C_L^2 + 0.0000398 C_L^3$$

$$A_t = T (4.7869 - 0.098185 T + 0.0010843 T^2) 10^{-3}$$

$$B_t = T (18.030 - 0.816400 T + 0.0166700 T^2) 10^{-6}$$

水理条件の設定に際し、2 層流の内部波の安定、不安定の問題は界面の挙動に影響するため、現地の現象と合わせる必要がある。クーリガン数で評価すると現地は不安定であるため、実験においても不安定域となる範囲でクーリガン数 1.08 として設定した。このクーリガン数における、下層の流速は 0cm/s で上層の流速は 6.6cm/s である。この上層の流速を、本研究では上

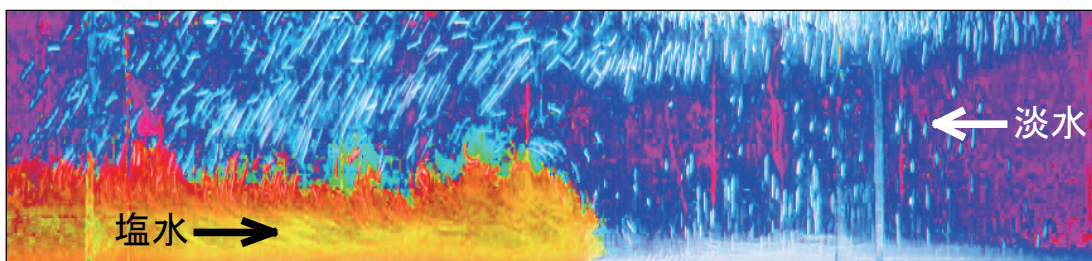


写真-1 画像処理済みの流況写真 [格子状構造物なし 10 秒経過]

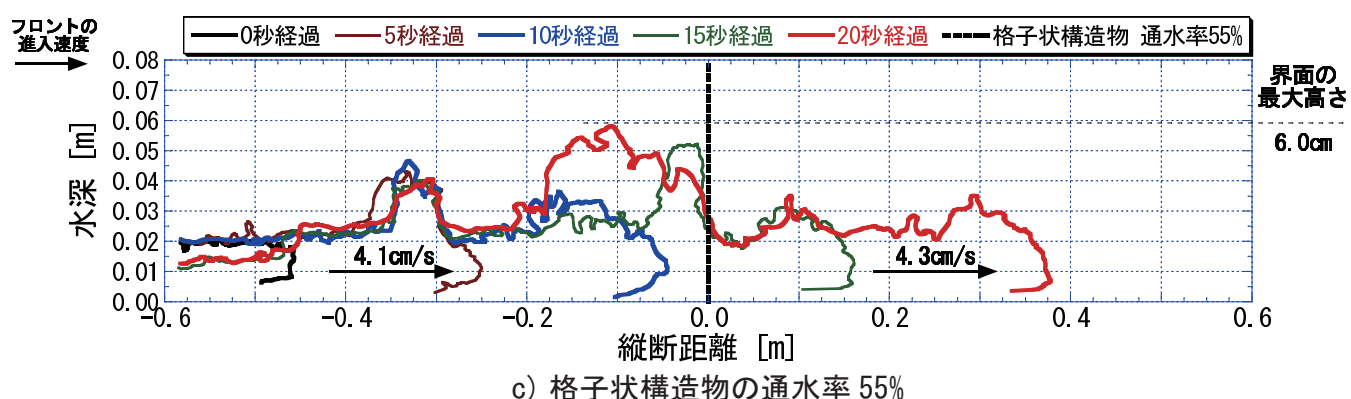
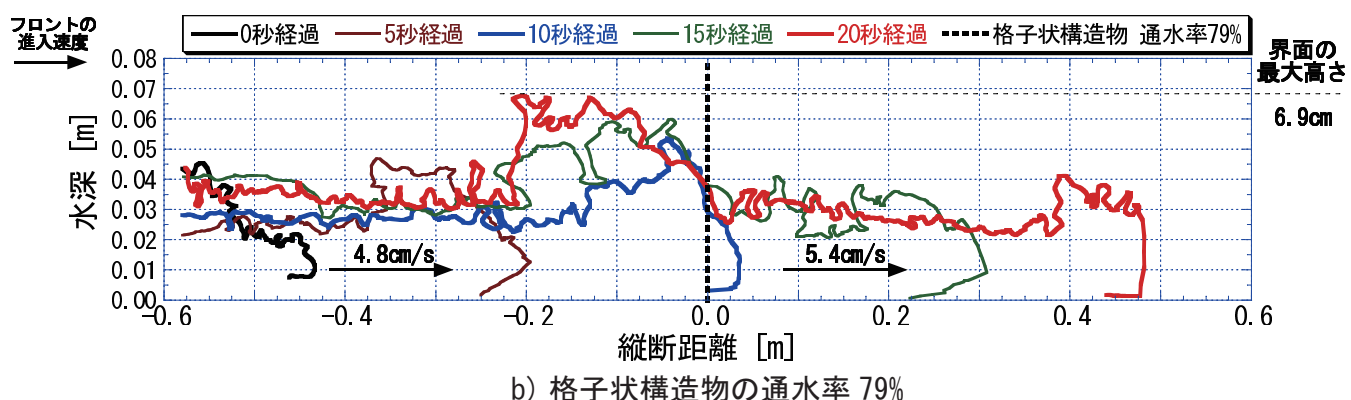
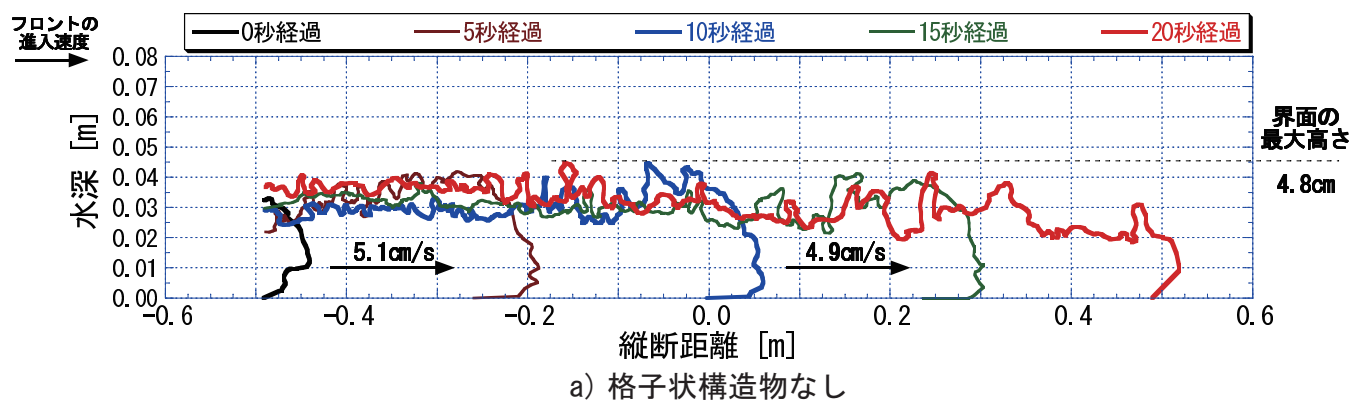


図-8 淡水と塩水の界面の時間的变化

層と下層の相対流速として考えて、上層と下層の流速を決定し流量を設定した。上記手法により設定した塩水遡上実験の水理条件を表-3に示す。なお、表-3の水深は測定値である。

(2) 塩水遡上の実験結果

実験の測定項目は、写真による流況の測定および白色トレーサによる流速測定である。撮影した写真を淡水と塩水の界面が明瞭となるように画像処理し、その画像から界面の位置を読み取った。撮影間隔は5秒間であり、写真1枚のシャッタースピードは0.5秒であ

表-3 塩水遡上実験の水利条件

上流からの淡水流量 Q_1 [l/s]	0.20
下流からの塩水流量 Q_2 [l/s]	0.37
塩分濃度 C_L [psu]	27.0
淡水の水温 T_1 [°C]	20.0
塩水の水温 T_2 [°C]	20.0
実験前の初期水深 H [cm]	10.2
実験後の水深 H [cm]	10.5

る。写真-1 は画像処理後の一例である。写真-1 の淡水中の白線はトレーサーであり、このトレーサーが界面に進入すると界面に凹凸が発生するため界面のデータには乱れがある。図-8 に 5 秒毎の界面データの時間的变化を示し、以下に図-8 において検討を行う。

a) 塩水のフロント進入速度と界面の最大高さ

5 秒毎の界面データを用いて、塩水のフロント進入速度 U_S [cm/s] を算出し図-8 に示す。格子状構造物がない場合の U_S は平均して 5.0cm/s である。

通水率 79 %において、格子状構造物手前で U_S は 4.8cm/s と構造物がない場合に比べ 0.2cm/s 遅くなっている。格子状構造物手前の界面は、塩水が構造物に衝突するため構造物がない場合に比べ界面が 2.1cm 上昇している。界面が上昇することにより塩水のエネルギー水頭が大きくなり、構造物通過後は U_S が 5.4cm/s と構造物手前よりも 0.6cm/s 速くなっているのが分かる。

通水率 55 %において、格子状構造物手前で U_S は 4.1cm/s と構造物がない場合に比べ 1.0cm/s 遅くなっている。これは、通水率 55 %の流速の減衰率が通水率 79 %のそれよりも大きい事によると推定出来る。格子状構造物手前の U_S が通水率 79 %に比べて遅いため、構造物直前の界面は通水率 79 %の場合よりも上昇しない。このため構造物通過後の U_S は 4.3cm/s と、通水率 79 %の場合よりも速くはならないと推定出来る。

b) 流速の減衰率

格子状構造物による U_S の減衰率について、格子状構造物がない場合を U'_S として、流速の減衰率を $(U'_S - U_S)/U'_S \times 100$ とすると、通水率 55 %で減衰率 20 %、通水率 79 %で減衰率 6 %であった。抗力測定実験で算出された減衰率は通水率 50 %で減衰率 23 %、通水率 85 %で減衰率 5 %であり、塩水遡上実験と比べて同程度である事が分かった。

c) 構造物の塩水遡上速度への影響

構造物の通水率の違いによる塩水遡上速度の違いを明らかにするために、実験の塩水のフロント位置の時間変化を整理した。図-9 は縦軸に時間、横軸に塩水のフロント位置をとって図示したものである。塩水遡上速度は、通水率が小さくなるにしたがって遅くなる傾

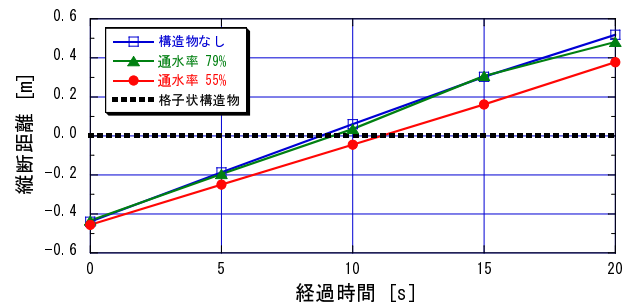


図-9 各通水率の時間毎の塩水のフロント位置

向を示している。この結果から、塩水が遡上する場合すなわち上げ潮時においては、通水率の小さい方が塩水遡上の抑制効果が大いと言える。一方、塩水が順流となる場合すなわち下げ潮時においては、通水率が小さい場合塩水の流下速度が遅くなるため、いったん構造物上流へ塩水が遡上した場合には、塩水遡上抑制には不利となる。このように、塩水遡上対策として櫛状構造物を考える場合には、順流時および遡上時の塩水進行速度をともに考慮し、塩水の遡上と流下を総合的に判断する必要がある。

4. おわりに

格子状構造物の抗力測定実験と塩水遡上実験から以下の事が明らかとなった。

- 1) 抗力測定実験より、格子状構造物の抗力係数を定量的に算出した。格子状構造物の抗力は、単数の円柱の抗力と比べて 1.18 倍であった。
- 2) 塩水遡上実験より、上げ潮時においては、通水率の小さい方が大きい場合に比べて塩水遡上の抑制効果が大いと言える。
- 3) 2 つの実験より、格子状構造物の通水率の違いにより流速の減衰率が異なり、淡水と塩水のどちらの場合も流速の減衰率は同程度である。

謝辞：本研究は北海道開発局網走開発建設部より資料の提供等の御尽力、(株) 水工リサーチより実験等の御協力を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 池永均, 大束淳一, 三沢大輔, 内島邦秀, 檜山和男, 山田正：網走川における塩水遡上特性と塩水楔の形態変化に関する研究, 水工学論文集, 第 42 巻, 1998
- 2) 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, 1996
- 3) 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, 1996
- 4) 椿東一郎：水理学 2, 森北出版株式会社, pp.52, 1996.

(2006. 9.30 受付)