

透過性構造物による塩水遡上抑制効果についての研究

A Study of Salinity Intrusion Controlling Effect by Permeable Structures

吉川 泰弘* 安田 浩保** 渡邊 康玄***

Yasuhiro YOSHIKAWA, Hiroyasu YASUDA and Yasuharu WATANABE

北海道東部の網走川下流部に位置する網走湖は、淡水層と塩水層を有する汽水湖であり、その塩水層は塩水遡上による塩水の湖内への流入により近年上昇傾向にある。塩水層は無酸素状態となっており、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を抑制する対策が望まれている。本研究では、塩水遡上を抑制するための構造物として鮭類捕獲施設である「やな」に着目した。「やな」による塩水遡上抑制効果を評価するために、「やな」を透過性構造物として扱い水理実験と数値計算を実施した。これにより以下の事が明らかとなった。1) 従来の1次元2層流モデルに界面の形状抵抗を導入する事により、強混合型の塩水楔の挙動を数値計算により再現可能である事が示唆された。2) 透過性構造物の塩水遡上抑制効果は、小潮から大潮にかけては効果が大きく、大潮から小潮にかけては効果が小さいことが数値計算結果から推定された。

《キーワード：塩水遡上；透過性構造物；水理実験；数値計算；網走川；網走湖》

On the Abashiri Lake in Eastern Hokkaido, the inflow and accumulation of natural and artificial pollutants has increased the risk of blue tides, which can damage fishery. This study examined the use of a permeable fishing weir, similar to those used for catching salmon, in controlling salinity intrusion. Hydraulic experiments and numerical calculations revealed the following. 1) Conventional one-dimensional two-layer flow models that consider form drag at the boundary between fresh and saline water can reproduce the behavior of the saline wedge. 2) Permeable structures, such as fishing weirs, are effective in controlling salinity intrusion when the tide is changing from neap tide to spring tide, but not when it is changing from spring tide to neap tide.

《Key Words : Salinity Intrusion ; Permeable structures ; hydraulic experiment ; numerical analysis ; abashiri river ; abashiri lake》

1. はじめに

河川感潮域では塩水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。網走川と網走湖の周辺概要図を図-1に示す。網走湖は塩水流入¹⁾のため下層に塩水層、上層に淡水層を持つ汽水湖であり、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、無酸素状態である塩水層が上昇傾向にあり、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。

従来までに塩水遡上を抑制する対策として、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、これらはいずれも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。このため、網走川では、鮭類の捕獲を目的として設置されている「やな」を塩水遡上抑制のための透過性構造物と見なす対策が検討されている。この対策法は、従来法とともに有力な対策案と言えよう。

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、抗力測定実験より透過性構造物の抗力係数を測定し、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検討を行った。

第二段階として、実河川において透過性構造物が塩水の遡上と流下に対して及ぼす影響を総合的に判断するために、1潮汐の変動を連続的に捉える数値計算を実施して透過率の違いによる影響を調べた。また、時間の経過とともに現れる影響を明らかにするために、小潮、中潮、大潮を含む1ヶ月間の数値計算を実施して検討を行った。なお、検討に先立って数理モデルの構築を行い、実験値と計算値および観測値と計算値の比較から妥当性を確認した。

2. 抗力測定実験

網走川の「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透過性構造物としている。透過率の異なる3つ

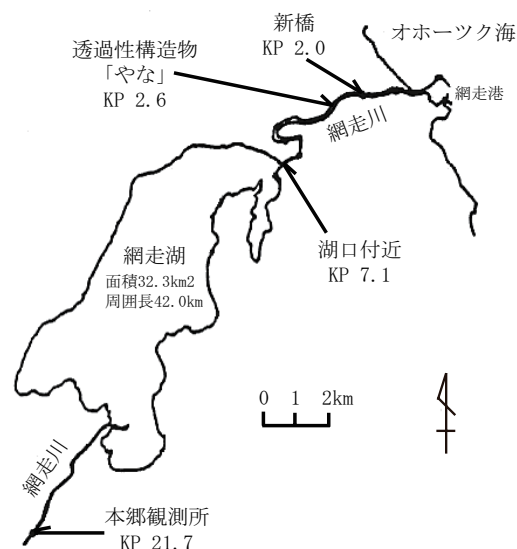


図-1 網走川と網走湖の周辺概要図

の透過性構造物を用いて、これらの抗力係数を水理実験により測定した。本論文における透過率とは、流水の横断面積に対する構造物の通水孔面積の率(%)である。例えば通水率85%の場合、100%の流水面積に対して15%は構造物で85%は通水孔となる。

2.1 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

実験の水理条件は、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に水理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℃、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の箇所測定した。

表-1 抗力測定実験の水理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/ν)

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

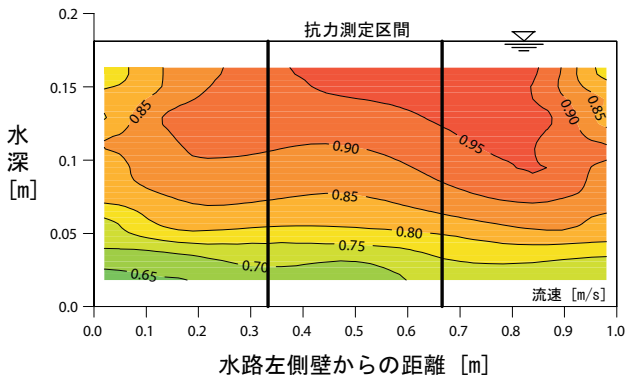


図-2 実験水路内の流速コンター図

b) 透過性構造物

図-2は水理条件 CASE 4 構造物なしの場合の測定区間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。透過性構造物の抗力測定は、水路側壁の影響を控除するために、透過性構造物を縦方向に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、出力電圧と重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。

透過性構造物は透過率 50%、70%、85%の3つの構造物を用いた。透過性構造物の設置状況を図-3に示し、構造物の拡大写真を写真-1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 0.5 m 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、透過率 50% で $1.0 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm}$ 、透過率 70% で $2.0 \text{ cm} \times 2.0 \text{ cm}$ および透過率 85% で $3.3 \text{ cm} \times 3.3 \text{ cm}$ である。なお、網走川の「やな」の透過率は約 83% である。

2. 2 抗力測定実験の結果

a) 透過性構造物の抗力

複数の円柱で構成されている透過性構造物の抗力 D (測定値) と、既往文献⁴⁾で既知である単数の無限長さの円柱の抗力係数を用いて算出した抗力 D' との比較を行い、透過性構造物が受ける抗力について検討を行

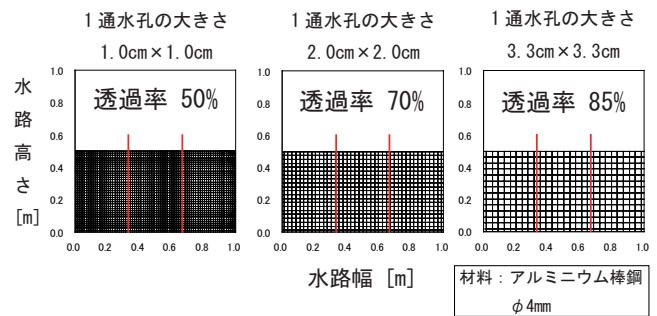


図-3 透過性構造物の設置状況

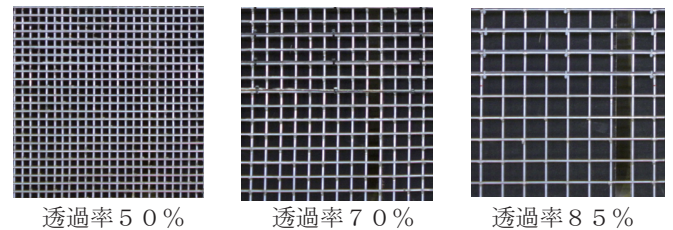


写真-1 透過性構造物の拡大写真

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 は透過性構造物から 12 cm 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、透過性構造物の抗力 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、透過率 50% は透過率 70%、85% 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 $0.52 \text{ cm} (=1.3d)$ であり、透過率 50% の 1 通水孔は $1.0 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm}$ 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、透過率 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、既往文献で既知である単数の無限長さの円柱の C_D を用いて抗力を

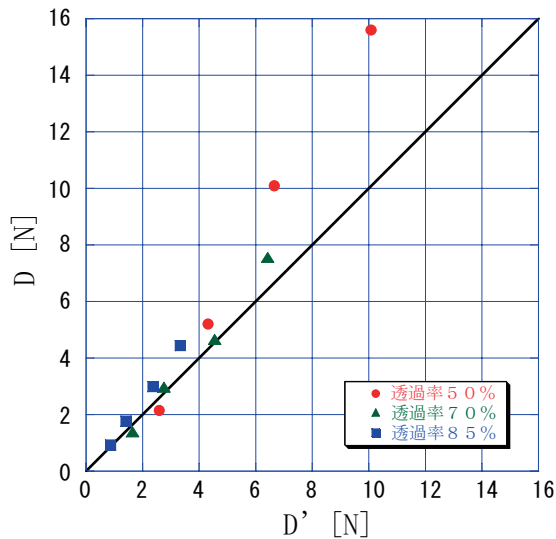


図-4 D' と D の関係図

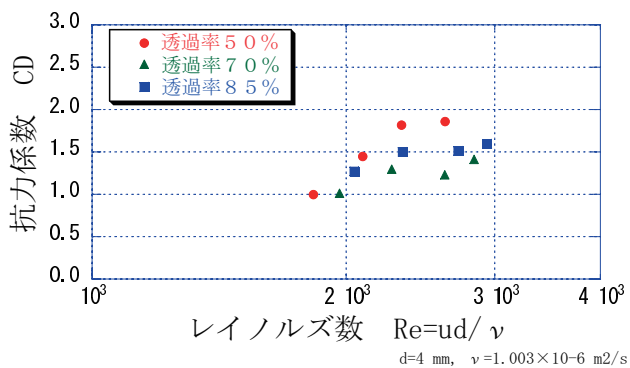


図-5 各透過率の C_D と Re の関係図

算出する場合、透過性構造物の透過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。

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

b) 各透過率の抗力係数

透過性構造物の透過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、どの透過率でも C_D は 1.0 から 2.0 の範囲内に収まり、オーダーは同程度であると言える。

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

c) 各透過率の流速の減衰率

透過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

表-2 透過性構造物の損失水頭

透過率	50%	70%	85%
損失水頭 [m]	0.025	0.020	0.005

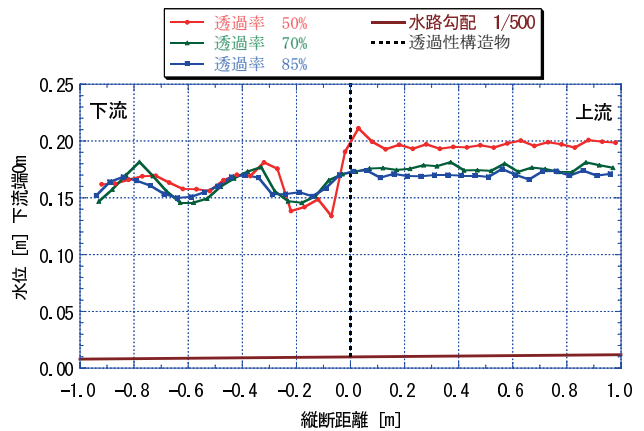


図-6 透過性構造物を設置した時の縦断水位 (CASE 3)

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、透過率 50% で減衰率 23%、透過率 70% で減衰率 10%、透過率 85% で減衰率 5% であり、透過率 50% で流速の減衰率が多い。この実験において、透過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) 透過性構造物による縦断水位変化

透過性構造物の透過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、透過性構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、透過率が小さいほど流速の減衰率が多いため、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透過性構造物の損失水頭で評価できる。透過性構造物の損失水頭を表-2 に示す。表-2 より、損失水頭は透過率 50% で 0.025、透過率 85% で 0.005 である。透過率が小さいほど透過性構造物の損失水頭が大きくなり、透過性構造物の上流水位は上昇すると言える。

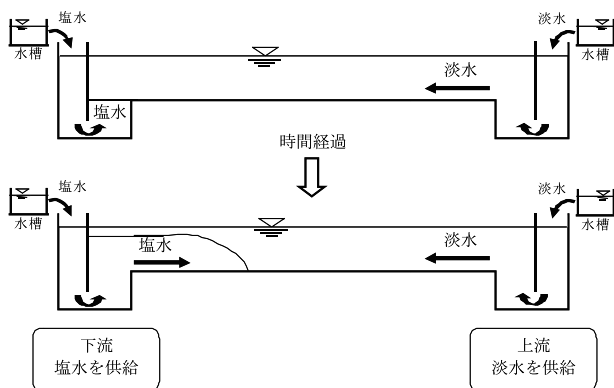


図-7 塩水遡上実験の概念図

3. 塩水遡上実験

本実験は、透過性構造物の透過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行った。

3.1 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、水路縮尺は現地と実験の水深比から 1/25 であり、水路勾配は現地に合わせて水平とした。実験水路のマニングの粗度係数は、予備実験から 0.011 である。

塩水遡上実験の手順の概念図を図-7 に示す。最初に上流の水槽から淡水のみを供給して、水深を一定とする定常状態とする。次に下流の水槽から塩水を供給する事により、塩水を上流へと遡上させた。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範囲を塩水と見なすこととした。なお、実験に用いた透過性構造物については、透過率 79%と透過率 55%の 2 種類の市販の構造物を用いた。

a) 実験条件

塩水遡上実験は密度流とな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いるため詳細を述べる。

実験の下層 (塩水) が受ける重力の大きさと、現地のそれとを一致させた。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

表-3 塩水遡上実験の水理条件

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

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。

$$\begin{aligned} \rho &= \sigma_t / 1000 + 1 \\ \sigma_t &= \sum + (\sigma_0 + 0.1344) [1 - A_t + B_t (\sigma_0 - 0.1324)] \\ \sum &= - \left[(T - 3.9)^2 (T + 283.0) \right] / \left[(503.570)^2 (T + 67.26) \right] \\ \sigma_0 &= -0.069 + 1.4708 C_L \\ &\quad - 0.001570 C_L^2 + 0.0000398 C_L^3 \\ A_t &= T (4.7869 - 0.098185 T + 0.0010843 T^2) 10^{-3} \\ B_t &= T (18.030 - 0.816400 T + 0.0166700 T^2) 10^{-6} \end{aligned}$$

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。現地の内部波はクーリガン数で評価すると不安定であるため、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。このときのクーリガン数の定義上、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。

3.2 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ー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と高さを読み取った。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 秒である。実験の測定区間については、上下流の影響を排除するため水路中央を中心に 1m とした。写真-2 は画像処理後の一例である。写真-2 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。

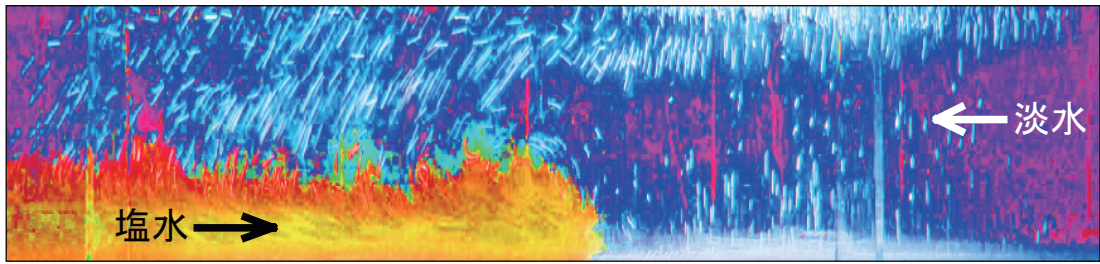
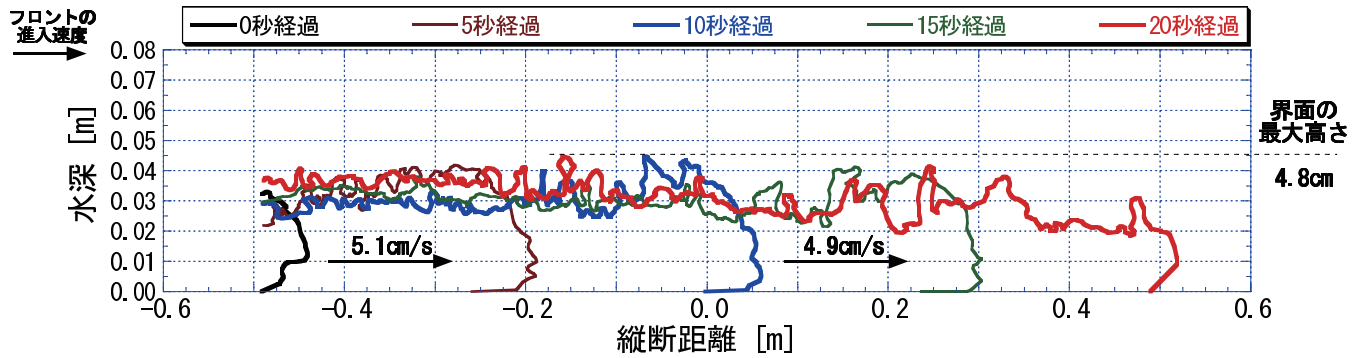
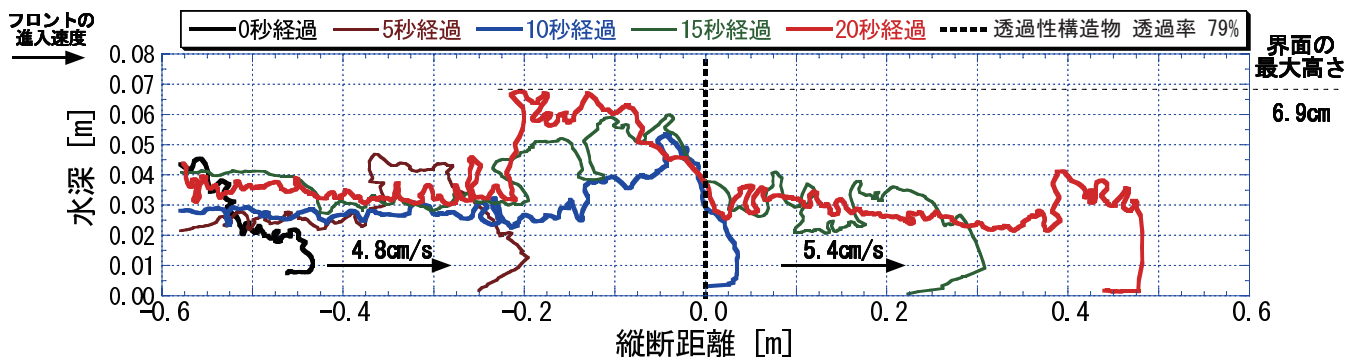


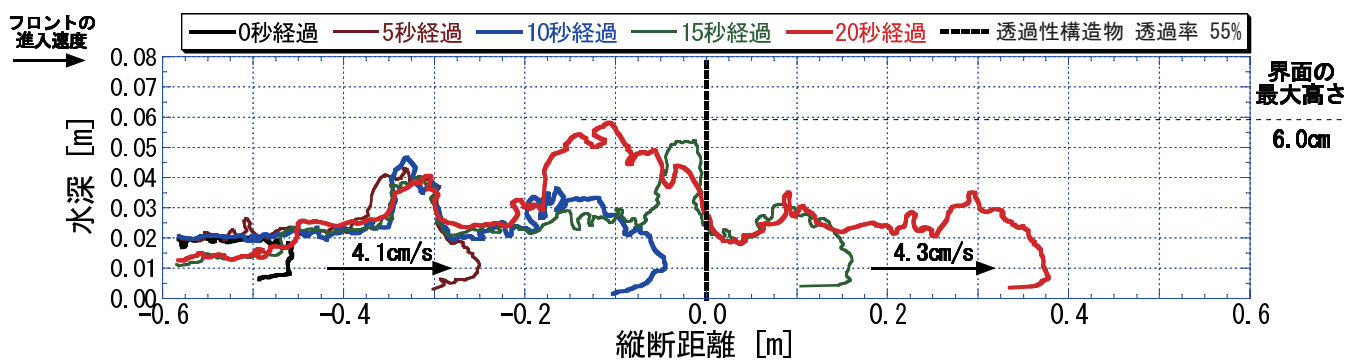
写真-2 画像処理済みの流況写真 [透過性構造物なし 10 秒経過]



a) 透過性構造物なし



b) 透過性構造物の通水率 79%



c) 透過性構造物の通水率 55%

図-8 淡水と塩水の界面の時間的变化

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。透過性構造物がない場合の U_S は平均して 5.0 cm/s である。

透過率 79% において、透過性構造物手前で U_S は 4.8 cm/s と構造物がない場合に比べ 0.2 cm/s 遅くなっ

ている。透過性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 2.1 cm 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、構造物通過後では U_S が 5.4 cm/s と構造物手前よりも 0.6 cm/s 速くなっているのが分かる。

透過率 55% において、透過性構造物手前で U_S は

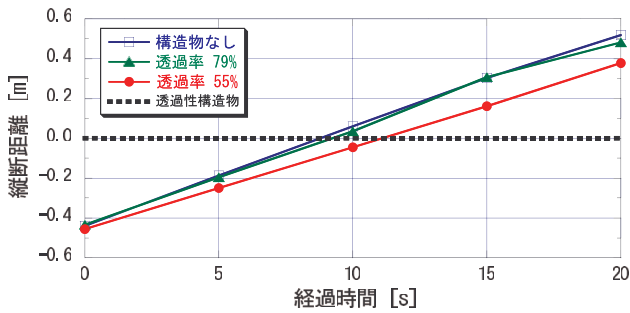


図-9 各透過率の時間毎の塩水のフロント位置

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、透過率 55% の流速の減衰率が透過率 79% のそれよりも大きい事によると推定出来る。透過性構造物手前の U_S が、透過率 79% に比べて遅いため構造物直前の界面は透過率 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 において、透過率 55% の場合 (4.3cm/s) は塩水水深 (界面) が低いため、透過率 79% の場合 (5.4cm/s) に比べて遅いと推測出来る。

b) 流速の減衰率

透過性構造物による U_S の減衰率について、透過性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、透過率 55% で減衰率 20%、透過率 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透過率 50% で減衰率 23%、透過率 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

構造物の透過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、透過率が小さくなるにしたがって遅くなる傾向を示している。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、透過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、透過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. 数理モデルの構築

実河川における透過性構造物の塩水遡上への影響を長期的総合的に評価するために、上記の 2 つの実験から得られた知見を用いて、計算負荷の比較的小さい 1 次元 2 層流モデルを基として数理モデルの構築を行った。

まず、上層、下層に関する連続の式は、

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q_1}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q_2}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

である。ただし本研究の数理モデルは密度界面で現象を議論しているため、下層から上層への連行は無視し、これに伴い密度に関する方程式を解いていない。一方、運動の方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + g \left(\frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) \\ + g (i_{f1} + i_{fs} + i_{ft1}) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + g \left(\frac{\partial (1 - \epsilon) h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) \\ + g (i_{f2} + i_{fs} + i_{ft2}) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

である。ここで、 h : 水深 [m]、 Q : 流量 [m^3/s]、 B : 川幅 [m]、 u : 流速 [m/s]、 i_0 : 河床勾配、 i_{f1} 、 i_{f2} : 摩擦勾配、 i_{fs} : 透過性構造物の抵抗項、 i_{ft} : 界面の形状抵抗項、 x : 縦断距離 [m]、 t : 時間 [s]、添え字 1 は上層 (淡水層)、添え字 2 は下層 (塩水層) を表す。

4.1 摩擦抵抗

界面抵抗係数 f_i は上層のフルード数とレイノルズ数の積より求められる金子の式⁵⁾を、河床粗度に関する抵抗係数に関してはマンニングの粗度係数 n を用いた。

$$f_i = 0.2 \times (R_e F_d^2)^{-0.5} \quad (9)$$

$$f_b = \frac{2gn^2}{h_2^{1/3}} \quad (10)$$

ここで、 $R_e = \frac{u_1 h_1}{\nu}$ 、 $F_d = \frac{u_1}{\sqrt{\epsilon g h_1}}$ である。さらに、摩擦勾配 i_{f1} 、 i_{f2} は、

$$i_{f1} = \frac{f_i}{2gh_1} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (11)$$

$$\begin{aligned} i_{f2} = \frac{f_b}{2gh_2} u_2 |u_2| \\ - \frac{f_i}{2gh_2} (1 - \epsilon) (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \end{aligned} \quad (12)$$

として、運動の方程式に導入した。なお、金子の式⁵⁾は実験値および観測値から導出された界面抵抗係数の式であり、この適用範囲は、 $10^2 \leq (R_e F_d^2) \leq 6 \times 10^5$ である。このため、本研究の塩水遡上実験に対しては、理論的に導かれた下記の Arita-Jirka⁶⁾ による式を用いている。 E は連行係数を表す。

$$f_i = \frac{2E}{|u_1 - u_2|}$$

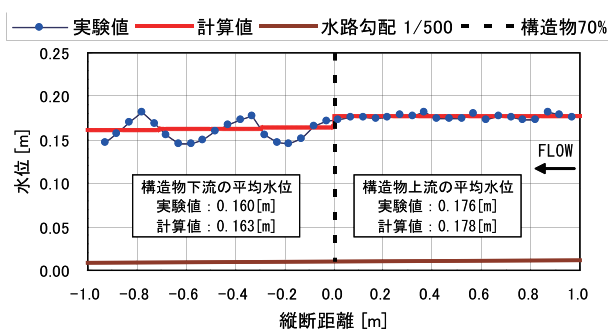


図-10 水位の実験値と計算値 (構造物 70%、CASE 3)

$$E = |u_1 - u_2| \times \left[0.038 \left(1 - \frac{R_{i1}}{\sqrt{R_{i1}^2 + R_{i*}^2}} \right) + \frac{2}{R_{e1}} \left(\frac{h_1}{\delta_u} \right) \right]$$

$$R_{i1} = \frac{1}{F_{d1}^2}, \quad F_{d1} = \frac{u_1}{\sqrt{egh_1}}$$

$$R_{i*} = 0.25, \quad R_{e1} = \frac{u_1 h_1}{\nu}$$

$$R_{e1} \leq 500 \text{ (層流)} \quad \dots \quad \left(\frac{h_1}{\delta_u} \right) = 1$$

$$R_{e1} \geq 500 \text{ (乱流)} \quad \dots \quad \left(\frac{h_1}{\delta_u} \right) = \sqrt{\frac{500}{R_{e1}}} + \frac{R_{i*}}{\sqrt{R_{i1}^2 + R_{i*}^2}} \left(1 - \sqrt{\frac{500}{R_{e1}}} \right)$$

4.2 透過性構造物の抵抗

透過性構造物の透過率の違いによる塩水遡上への影響を評価するために、次式の抵抗項を下層、上層のそれぞれの運動の方程式に加えた。

$$i_{fs} = \alpha \frac{C_D}{2g\Delta x} u |u| \quad (13)$$

$$\alpha = 1 - \frac{\gamma}{100} \quad (14)$$

ここに、 C_D : 構造物の抗力係数、 γ : 構造物の透過率 [%] であり、 C_D は前述の抗力測定実験より平均値 $C_D=1.41$ とした。 $C_D=1.41$ の妥当性を確認するために、図-6 に示した構造物 70% の実験を例にとり、水位の計算値と実験値の比較を図-10 に示す。図-10 より、構造物下流における鉛直方向に上下する水面形を計算で再現出来ていない。しかし、縦断的な平均水位で比較すると構造物の上下流ともに良く一致しており、構造物の縦断的な影響について議論している本研究において、 $C_D=1.41$ とした場合の計算結果は妥当であると判断し検討を進めた。

4.3 界面の形状抵抗

一般に、1 次元 2 層流は緩混合型の塩水楔の解析に対して有効とされるものの、強混合型の塩水楔に対しては先端部の界面形状が不連続となるなどの理由から適用事例はほとんど見られない。その理由は先端部に

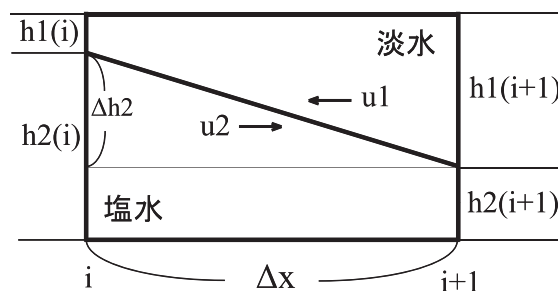


図-11 界面の形状抵抗の概念図

おける急峻な界面勾配が第一義的な問題となるためである。

これに対して著者らは、1 次元 2 層流の数値モデルに基づきながらも緩混合から強混合までの塩水楔を再現しうる解析法について検討を重ねてきている。強混合型の塩水楔のように先端部における急峻な界面勾配はその形状抵抗の導入により解決されるものと考えられ、この界面の形状抵抗は、界面の投影面積の関数となると予見される。この関数形では弱混合の塩水楔のように界面勾配が緩やかな場合はこの形状抵抗は小さくなり、強混合の塩水楔のように界面勾配が急峻となる場合は形状抵抗は大きくなる。

本研究では、この界面の形状抵抗を界面の投影面積と淡水と塩水の相対速度に比例する事を示す次式の形で考慮することにした。界面の形状抵抗の概念図を図-11 に示す。 $\frac{\Delta h_2}{\Delta x}$ が界面勾配を表している。

$$i_{ft1} = \frac{i_{ft}}{2gh_1} \frac{\Delta h_2}{\Delta x} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (15)$$

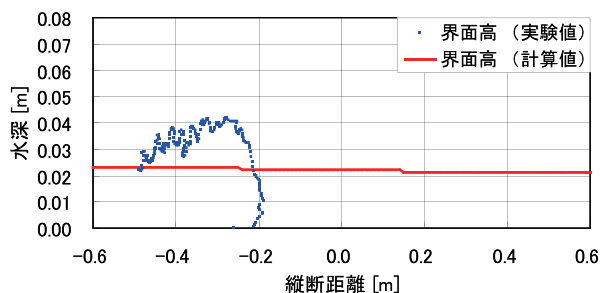
$$i_{ft2} = -\frac{i_{ft}}{2gh_2} \frac{\Delta h_2}{\Delta x} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (16)$$

ここに、 i_{ft} は界面の形状抵抗係数である。

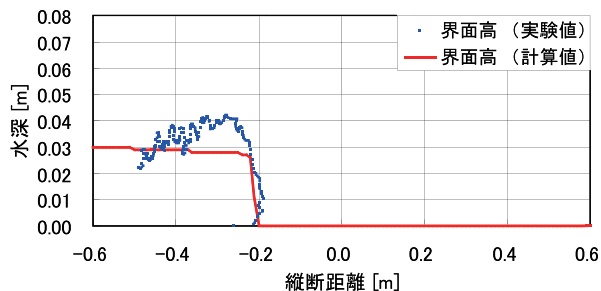
界面の形状抵抗を考慮した場合としていない場合の計算した界面の高さと実験値の値を図-12 a')、a) に示す。界面の形状抵抗を導入していない計算では、塩水楔の進入速度は実験値と比べて大幅に速くなるうえ、界面高が過小に評価されることが分かる。一方で、界面の形状抵抗を考慮した場合、図-12 b)、c) に示すように、塩水楔の浸入速度、界面位ともに実験値と計算値は一致していることが見てとれる。界面の形状抵抗係数 i_{ft} は、実験と計算の界面の先端位置においてその誤差が最小となる値 $i_{ft}=1.06$ を与えている。この値は界面抵抗係数の算出において Arita-Jirka の式⁶⁾を用いた場合の値であり、金子の式⁵⁾を用いた場合は $i_{ft}=1.22$ である。

4.4 構造物が存在する塩水遡上計算

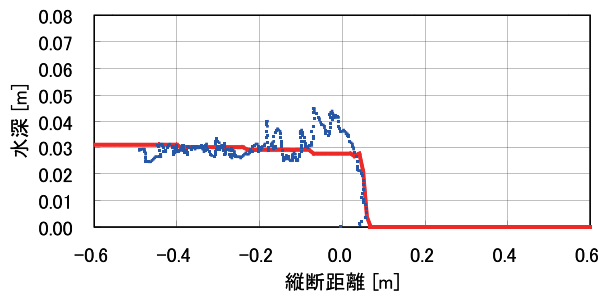
透過性構造物の抵抗項および界面の形状抵抗項を考慮した界面の計算値と界面の実験値を図-13 に示す。構



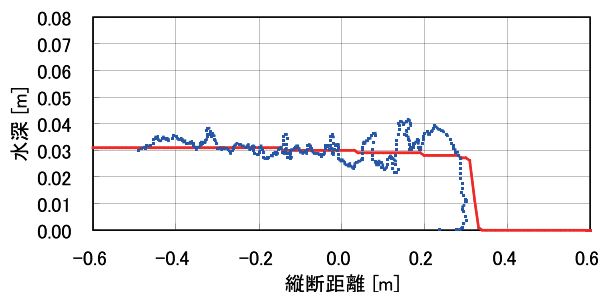
a') 0 秒経過 形状抵抗なし



a) 0 秒経過 形状抵抗考慮

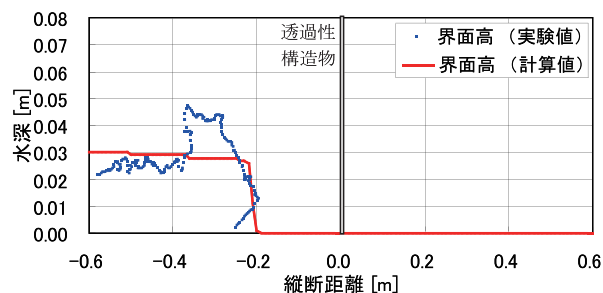


b) 5 秒経過 形状抵抗考慮

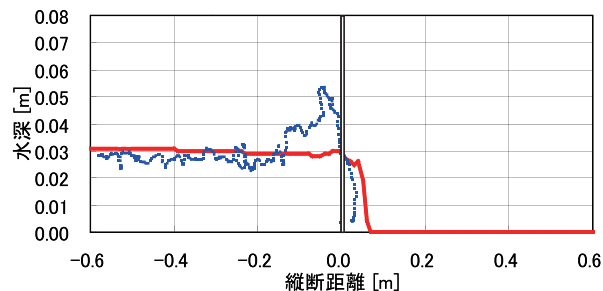


c) 10 秒経過 形状抵抗考慮

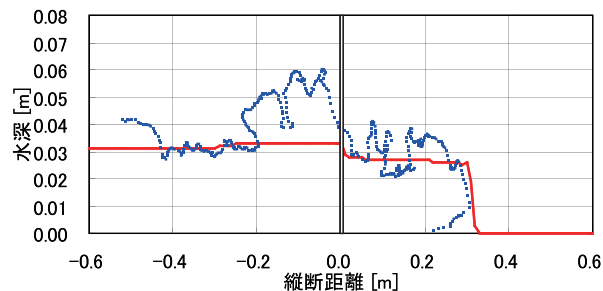
図-12 界面の実験値と計算値 (構造物なし)



a) 0 秒経過



b) 5 秒経過



c) 10 秒経過

図-13 界面の実験値と計算値 (構造物あり)

5. 数理モデルの妥当性の検討

構築した数理モデルの妥当性が実験において確認されたことから、実河川における妥当性について検討を行った。なお、このモデルによる計算値と比較するための観測データは、問題を簡単にするために透過性構造物である「やな」が撤去されている時期のものを利用した。

5.1 計算条件

計算に用いた河道は、平成 12 年に測量された横断データを基にして平均河床高および川幅を各断面毎に矩形断面として扱った。計算区間と河床高および川幅を図-14 に示す。計算区間は-3km~22km の 25km の区間である。計算期間は大潮時で観測期間の 2003 年 1 月 19 日 9:00~2003 年 1 月 20 日 9:00 の 24 時間とした。境界条件は、上流端で単位幅流量を下流端で水位を与えた。上流端の境界条件において、淡水の単位幅流量は $q_1=0.6[\text{m}^2/\text{s}]$ の一定値として与え、塩水の単位幅流量は $q_2=0.0[\text{m}^2/\text{s}]$ の一定値として与えた。下流端の境界条件は時刻潮位 [m] を与えた。塩水水深は次式⁴⁾で表

造物の透過率は 79%である。図-13 から構造物直上流の界面の高さおよび位置は一致しているが、構造物直下流の界面高の上昇については計算では再現出来ていない。本研究の数理モデルは 1 次元であり鉛直方向の流速を評価していないため再現出来ていないと推測される。しかし、本研究では、構造物の影響として構造物直上流の塩水遡上量の推定に主眼をおいている。このため、構造物直上流の界面の高さおよび構造物通過後の下層の先端位置は一致していることから、構造物の塩水遡上への影響を議論するうえで、本研究の数理モデルは実験レベルで妥当であると判断した。

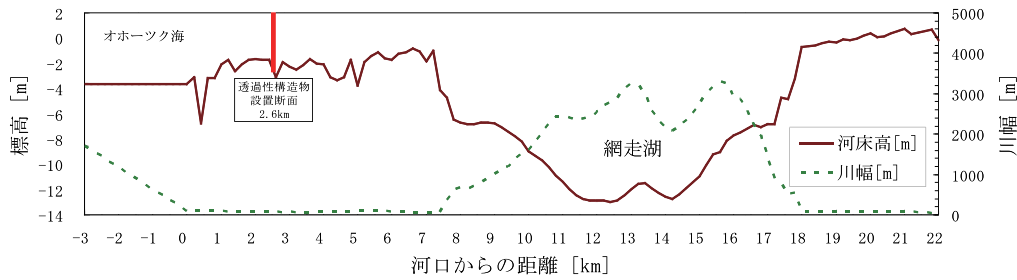


図-14 数値計算の河道条件 [河床高、川幅]

される限界内部水深とし、淡水水深は潮位と塩水水深の差より与えた。また、計算上の塩水の存在可能水深を 1mm とし、淡水水深の最低水深を 1mm と仮定している。

$$h_2 = HZ - h_1 - Z \quad (17)$$

$$h_1 = F_{io}^{2/3} \times (HZ - Z) \quad (18)$$

$$F_{io} = \frac{q_1}{\sqrt{\epsilon g (HZ - Z)^3}} \quad (19)$$

ここで、 h_1 ：下流端の淡水層水深 [m]、 h_2 ：下流端の塩水層水深 [m]、 HZ ：潮位 [m]、 Z ：下流端河床高 [m]、 q_1 ：下流端の淡水層単位幅流量 [m²/s] である。

なお、網走川の河口から 3km 海へ伸ばした場所を下流端としたのは、密度流の河口の条件である上層の密度フルード数の 2 乗が 1 となる場所をその地点と仮定したためである。

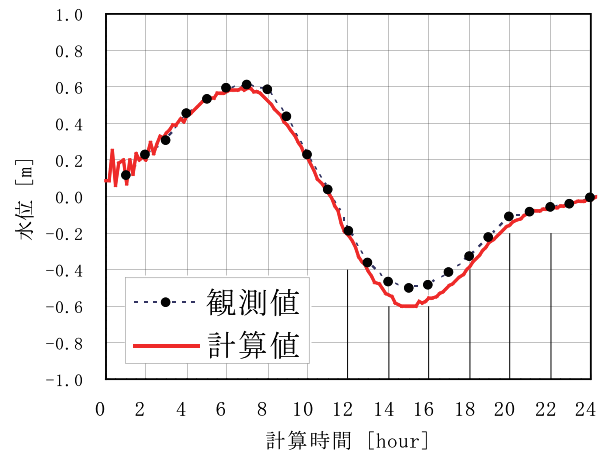
水温は観測データより淡水と塩水ともに 0[°C] とし、塩分濃度は淡水 0[psu]、塩水 25[psu] とした。塩水 25[psu] は、海の塩分濃度 30[psu] と網走湖の塩水層の塩分濃度 20[psu] の平均として決定した。マンシングの粗度係数に関しては、水理量に支配的な影響を与えるためその設定は非常に重要である。水理量の変化に応じたマンシングの粗度係数を岸・黒木^{8)、9)}の方法を用いてエネルギー勾配、水深、粒径により算出し、場所的・時間的に変化させて計算を行った。平均粒径は観測データより 24mm を与えた。網走湖内の淡水層と塩水層の界面の標高は実測値より約-4m であり-4m 以下は塩水として初期条件で与えた。計算断面間隔 $\Delta x=20$ [m]、計算時間ステップ Δt は CFL 条件を満たすように次式から算出した。

$$\Delta t = \frac{C_r \Delta x}{u_{max} + \sqrt{gh_{max}}} \quad (20)$$

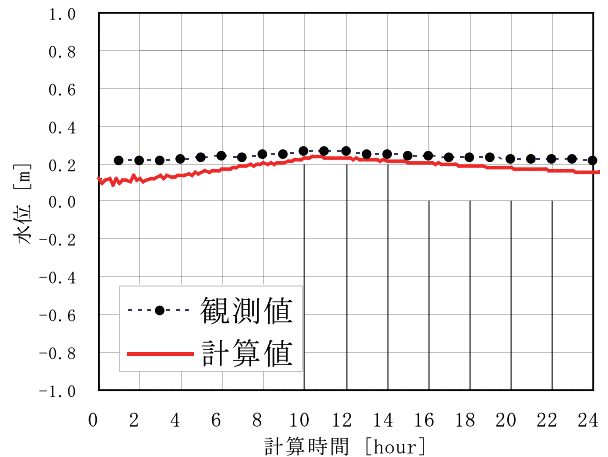
ここで、 u_{max} ：ある時刻の計算区間内における淡水または塩水の最大流速 [m/s]、 h_{max} ：ある時刻の計算区間内における淡水または塩水の最大水深 [m]、 C_r ：クーラン数で 0.07 として設定した。

5.2 実河川における観測値と計算値の比較

河口から湖口までの区間で下流側 (KP2.0 付近) と上流側 (KP7.0 付近) において、水位と淡水流速および塩



a) KP2.6

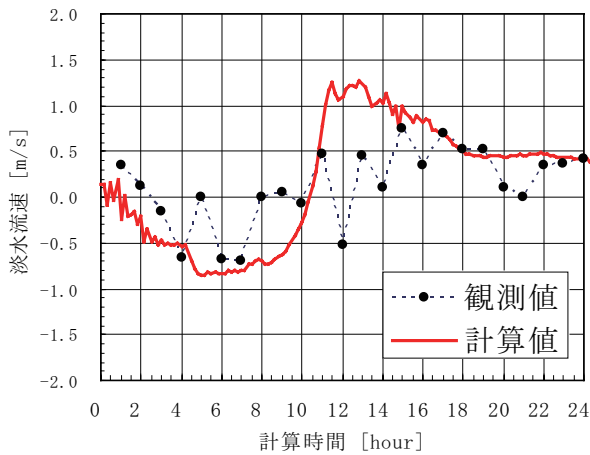


b) KP7.4

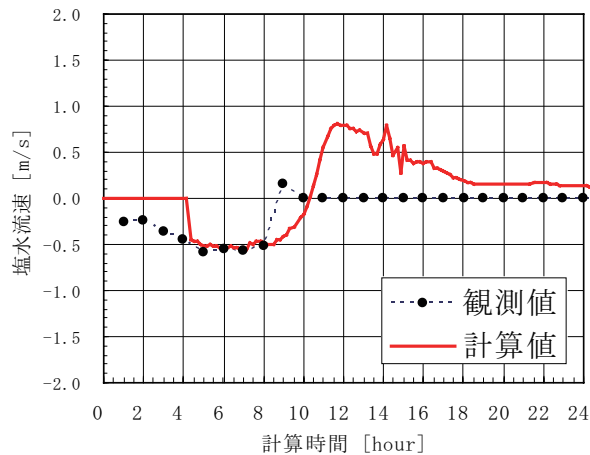
図-15 水位の観測値と計算値

水流速の観測値と計算値との比較を行い、実河川において構築した数値モデルの妥当性について検討した。

下流側および上流側において水位の観測値と計算値を図-15に示す。同図より下流側および上流側ともに一致していることが分かる。次に、観測データを 25[psu] を界面として淡水と塩水を区分けして、それぞれの平均流速を求めた。下流側の淡水流速と塩水流速の観測値と計算値を図-16に示す。図-16の淡水流速と塩水流速は、正が順流で負が逆流を表している。淡水流速においては、順流時に計算流速が観測流速に比べて速くなっている。しかし、逆流時を含めた全体的な傾向は捉えていると言える。塩水流速においては、逆流時



a) 淡水の流速



b) 塩水の流速

図-16 淡水流速と塩水流速の観測値と計算値 (KP2.0)

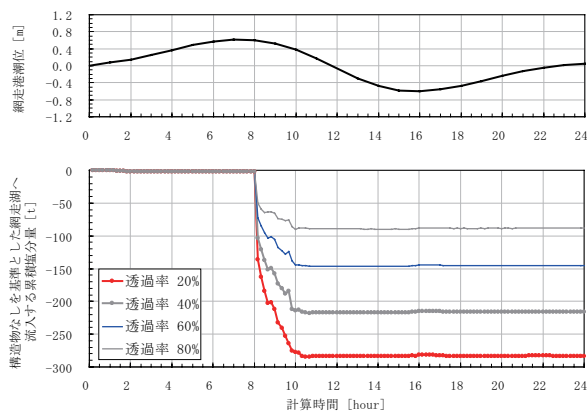
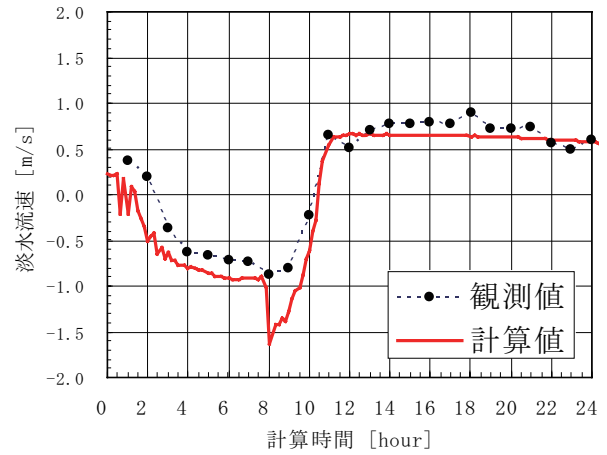
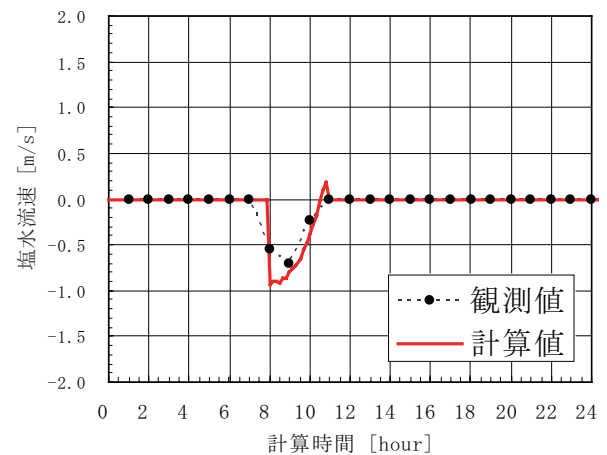


図-17 大潮 1 潮汐の透過性構造物の塩水抑制効果 (2003 年 1 月 19 日 9:00～2003 年 1 月 20 日 8:00)

には一致しているが、順流時には観測値が 0.0m/s に対して計算値が 0.5m/s 程度と速くなっており一致していない。この間の観測データでは 19psu の流体が順流方向に流れており、この流体は希釈されていると推測される。つまり、順流時には塩水は淡水に希釈されながら流下しているため、淡水と塩水の混合を無視した本モデルでは評価出来なかったものと考えられる。



a) 淡水の流速



b) 塩水の流速

図-18 淡水流速と塩水流速の観測値と計算値 (KP7.1)

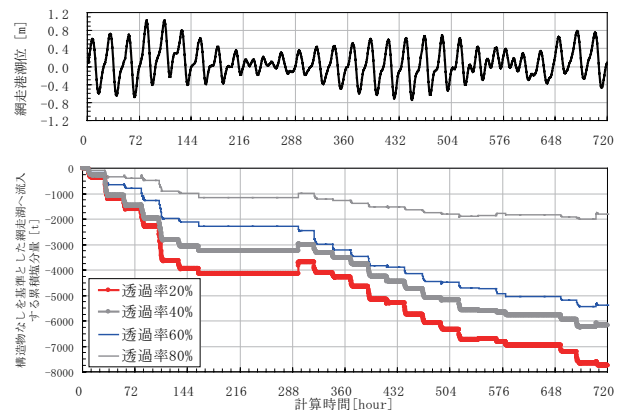


図-19 1ヶ月間の透過性構造物の塩水抑制効果 (2003 年 1 月 1 日 6:00～2003 年 1 月 31 日 5:00)

網走湖に流入する塩水量を評価する上流側において、淡水流速と塩水流速の観測値と計算値を図-18に示す。淡水流速の逆流時で一致していない箇所がある。この断面は KP7.1 であり図-14より網走湖へ流入する前の隆起した箇所である。このため水位差がつきやすいこの断面では水面勾配が大きくなるため、流速が速くなったと推測される。しかし、塩水流速は一致しているため、本検討は網走湖への流入塩水量に着目していることから、そのまま検討を進めることにした。

6. 潮汐規模および透過率の相違による塩水遡上抑制効果

6. 1 1 潮汐における構造物の塩水遡上抑制効果

本章では本研究で構築した数値モデルを用いて、上げ潮時と下げ潮時を含む大潮 1 潮汐 24 時間の数値計算を構造物の透過率を変えて実施した。透過率 100% の場合の計算結果を上げ潮、満潮、下げ潮、干潮に分けて図-20 に示す。青色は上流から下流へ向かう流速であり赤色はその逆方向の流速である。青線は水面を表し緑破線は界面（淡水と塩水の境界）を表している。図-20 より、塩水は上げ潮から満潮にかけて網走川を遡上し網走湖に流入しており、下げ潮から干潮にかけて海へとフラッシュされる現象が計算結果より分かる。

網走湖に流入する塩分量の計算結果を図-17 に示す。横軸に計算時間をとり縦軸に潮位と構造物が無い場合を基準とした網走湖へ流入する計算累積塩分量を図示しており、累積塩分量は流量と Δt 、塩分濃度から求めている。縦軸の累積塩分量は (各構造物の流入塩分量) - (構造物がない時の流入塩分量) として算出しており、塩水抑制効果があるほど負の方向 (図では下方向) へ向かう。

図-17 より、網走湖に塩水が流入する時間帯は、潮位ピーク時 (8 時間後) から下げ潮時 (10 時間後) の 2 時間であった。この塩水流入時における塩水遡上抑制効果は、構造物の目が細かいほどその効果は大きい。一方、下げ潮時における塩水遡上抑制効果は、当初、構造物の目が細かい事により塩水のフラッシュ効果が弱くなるため塩水遡上抑制には不利となる事が推定された。しかし、今回の大潮 1 潮汐の計算においては、構造物の目が細かい事による塩水遡上抑制効果の減衰はみられなかった。

構造物の塩水遡上抑制効果について、構造物がない場合の網走湖に流入する累積塩分量を 100 % とした場合、各構造物がある場合の網走湖に流入する累積塩分量は、97.3% (透過率 20%)、98.0% (透過率 40%)、98.6% (透過率 60%)、99.2% (透過率 80%) であった。大潮 1 潮汐の期間における今回の数値計算結果から、構造物の目が細かいほど塩水遡上抑制効果がある事が分かり、その程度を定量的に評価する事が出来た。

6. 2 1 ヶ月間における構造物の塩水遡上抑制効果

前項で大潮 1 潮汐における構造物の塩水遡上への影響が明らかとなったが、小潮や中潮ではその影響が異なる事が考えられる。この事を明らかにするために、小潮、中潮、大潮を含む 1 ヶ月の計算を実施した。横軸に計算時間をとり縦軸に潮位と網走湖に流入する計算累積塩分量を図-19 に示す。図-19 の潮位差に着目すると、潮位差が大きいほど塩水遡上抑制効果が大きく、潮

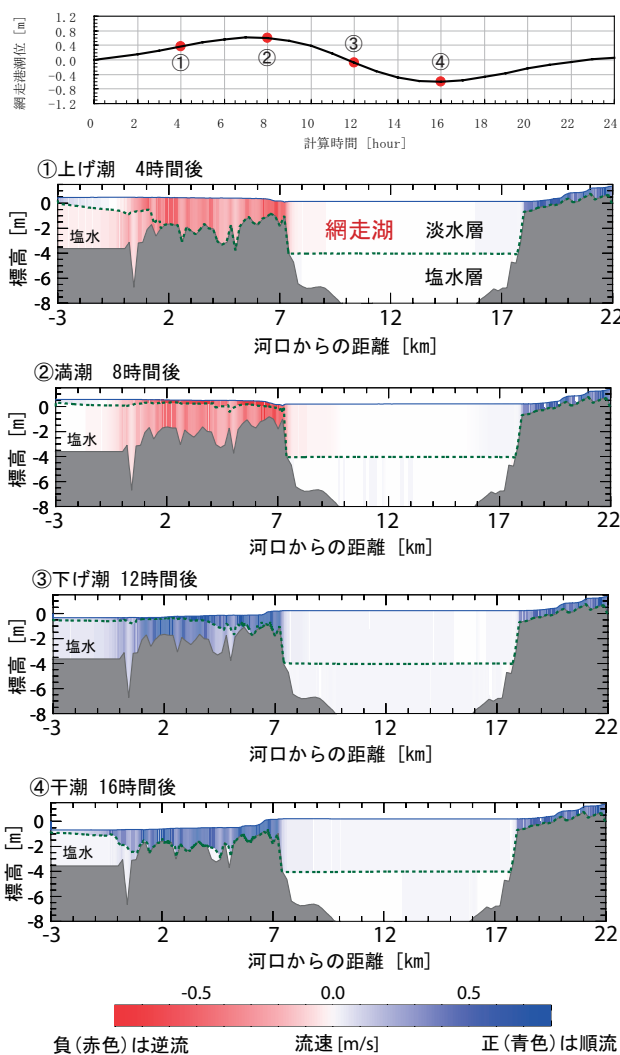


図-20 大潮 1 潮汐の計算結果 (2003 年 1 月 19 日 9:00~2003 年 1 月 20 日 8:00)、構造物がない場合

位差が小さいほど塩水遡上抑制効果が小さい。特に、潮位差が最小となる小潮時にはどの構造物の場合にも塩水遡上抑制効果はない。構造物がない場合の小潮時の計算結果を図-21 に示す。図-21 より塩水は網走湖に流入しておらず、このため小潮時には構造物による塩水遡上抑制効果がないと言える。一方、0 時間から 192 時間の短い期間でみると、小潮から大潮にかけて (0h~108h) 効果が大きく、大潮から小潮にかけて (108h~192h) 効果が小さいと計算結果から分かる。

構造物の塩水遡上抑制効果について、構造物がない場合の流入する累積塩分量を 100% とした場合、各構造物がある場合の流入する累積塩分量は、98.0% (透過率 20%)、98.4% (透過率 40%)、98.6% (透過率 60%)、99.5% (透過率 80%) であった。1 ヶ月の期間における今回の数値計算結果から、構造物の目が細かいほど塩水遡上抑制効果がある事が分かり、その程度を定量的に評価する事が出来た。

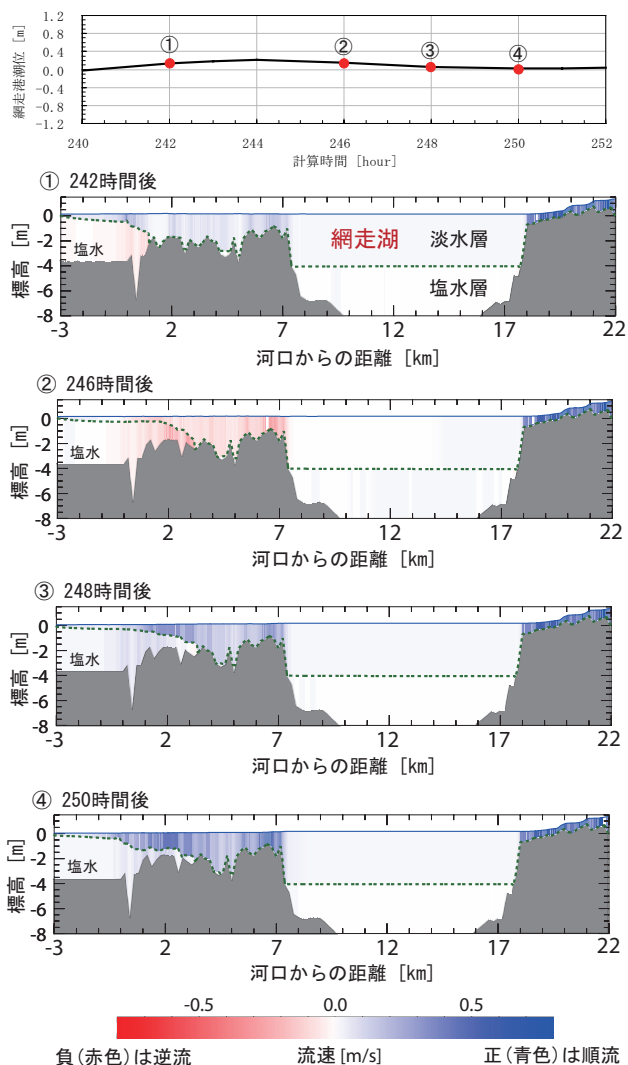


図-21 1ヶ月間計算の小潮時の計算結果、構造物がない場合

7. まとめ

本研究により以下の事が明らかとなった。

- 1) 抗力測定実験より、透過性構造物の抗力係数を定量的に算出した。透過性構造物の抗力は、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、透過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きいと言える。
- 3) 2つの実験より、透過性構造物の透過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。

4) 弱混合および緩混合の現象に対して、従来から用いられている1次元2層流モデルに界面の形状抵抗を考慮した塩水楔の数値モデルを構築した。このモデルによる解析結果は、強混合型の塩水楔を形成する網走川においてさえ水位および流速が観測値と一致することが確認された。界面の形状抵抗の導入により、1次元2層流モデルによっても強混合型の塩水楔の挙動を実用上十分な精度で評価しうる可能性がある事が示唆された。

5) 透過性構造物の塩水遡上抑制効果を把握する事を目的とした1ヶ月間の連続的な数値計算の結果から、小潮から大潮にかけては効果が大きく、大潮から小潮にかけては効果が小さいと分かった。

現地の透過性構造物の透過率を選定する際には、透過性構造物の通過を許容する魚類の大きさや、塩水遡上対策の対策期間と塩水抑制量の検討を行う必要がある。これに対して、本研究で示した塩水挙動の解析法は、一部簡便化が施された1次元計算であるものの、現地における塩水流速を十分な精度で再現可能であり、透過性構造物の透過率を選定する際の検討に資すると言える。

謝辞 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を頂きました。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, pp775-780, 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, pp511-516, 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, pp517-524, 1996
- 4) 椿東一郎: 水理学2, 森北出版株式会社, pp.52, 1996.
- 5) 金子安雄: 2層流境界面抵抗係数の一例, 第13回海岸工学講演会講演集, pp263-267, 1966.
- 6) Arita, M. and Jirka, G.H.: Two-layer model of saline wedge. 1, 2, J. hydr. Engrg, Proc. ASCE, Vol. 113, No. 10, p1229-1263, 1987
- 7) 椿東一郎: 水理学2, 森北出版株式会社, pp.201-203, 1996.
- 8) 河村三郎, 土砂水理学I, 森北出版株式会社, pp.227-231, 1982.
- 9) 吉川泰弘, 渡邊康玄: 物質輸送に与える大規模洪水の影響, 北海道開発土木研究所月報, 9月号, pp2-17, 2005.



吉川 泰弘*
Yasuhiro YOSHIKAWA
寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ
寒地河川チーム
研究員



安田 浩保**
Hiroyasu YASUDA
寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ
寒地河川チーム
研究員
博士(工学)



渡邊 康玄***
Yasuharu WATANABE
寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ
寒地河川チーム
上席研究員
博士(工学)