環－26

# 網走湖へ流入する塩水を抑制する透過性構造物の効果

寒地土木研究所　寒地河川チーム　○吉川　泰弘
安田　浩保
渡邊　康玄

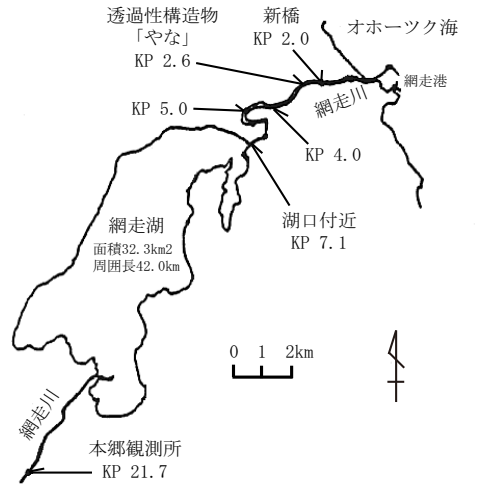
## 1.　はじめに

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．

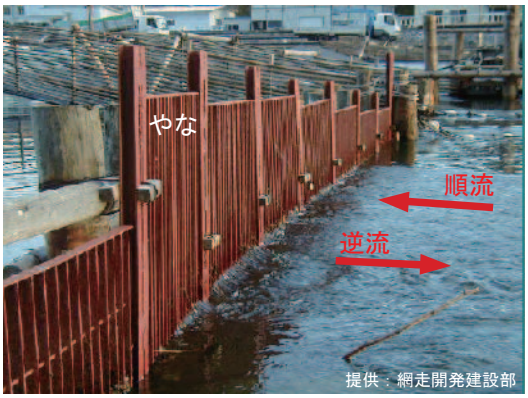
従来までに塩水遡上を抑制する対策として，堰の設置[2)]や気泡を河川横断方向に噴射する[3)]ことにより塩水遡上を抑制する対策法が提案され，これらはいずれも優れた効果を示すとされている．しかし，洪水時の安全性の確保，河川環境への負荷，装置の維持管理の面で懸念が残る．このため，網走川では，鮭類の捕獲を目的として設置されている「やな」を塩水遡上抑制のための透過性構造物と見なす対策が検討されている．この対策法は，従来法とともに有力な対策案と言えよう.「やな」の設置状況を**写真–1** に示す.

著者らは,「やな」を透過性構造物として扱い抗力測定実験から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ている[4)]，また，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次元２層流の数理モデルを構築し，計算結果から透過率の違いによる影響を検討している[5)]．しかし数理モデルの妥当性は，大潮時の観測値と計算値で比較して確認しているが，小潮時を含む長期間の計算結果の妥当性は確認していない．構造物の検討については，透過率の違いによる検討は行っているが，それ以外に設置箇所の違いや設置数の違いによる検討を行う必要がある．

本論文では，長期間の計算結果の妥当性を確認するために， 小潮と大潮を含む 20 日間の数値計算を




**図–1**　網走川と網走湖の周辺概要図




**写真–1**　網走川のやなの設置状況 (左岸から撮影)

Yasuhiro Yoshikawa，Hiroyasu Yasuda，Yasuharu Watanabe

行い観測値との比較を行った．また，構造物の設置箇所の違いおよび設置数の違いによる塩水遡上への影響を数値計算を用いて明らかにした．

## 2. 数理モデル

実河川における透過性構造物の塩水遡上への影響を評価するための数理モデルは，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構築した．上層と下層に関する連続の式は，

$$\frac{\partial h_1}{\partial t}+\frac{1}{B}\frac{\partial Q_1}{\partial x}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t}+\frac{1}{B}\frac{\partial Q_2}{\partial x}=0 \tag{2}$$

である．本研究の数理モデルの上層と下層の界面は密度界面と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，

$$\frac{\partial u_1}{\partial t}+u_1\frac{\partial u_1}{\partial x}+g\left(\frac{\partial h_1}{\partial x}+\frac{\partial h_2}{\partial x}-i_0\right)+g\left(i_{f1}+i_{fs}+i_{ft1}\right)=0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t}+u_2\frac{\partial u_2}{\partial x}+g\left(\frac{\partial \left(1-\epsilon\right)h_1}{\partial x}+\frac{\partial h_2}{\partial x}-i_0\right)+g\left(i_{f2}+i_{fs}+i_{ft2}\right)=0 \tag{4}$$

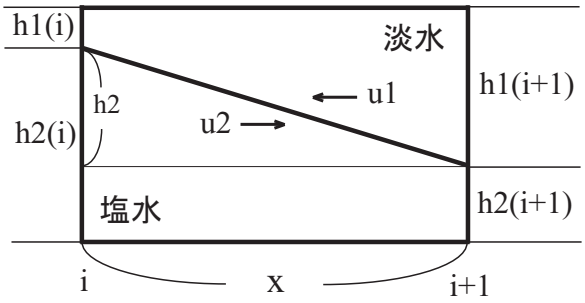
である．ここで，$h$：水深 [m]，$Q$：流量 [m$^3$/s]，$B$：川幅 [m]，$u$：流速 [m/s]，$i_0$：河床勾配，$i_{f1}$，$i_{f2}$：摩擦勾配，$i_{fs}$：透過性構造物の抵抗項，$i_{ft}$：界面の形状抵抗項，$x$：縦断距離 [m]，$t$：時間 [s]，添え字 1 は上層（淡水層），添え字 2 は下層（塩水層）を表す．

### (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[6]を，河床粗度に関する抵抗係数に関してはマニングの粗度係数 $n$ を用いた．

$$f_i=0.2\times\left(R_eF_d^2\right)^{-0.5} \tag{5}$$

$$f_b=\frac{2gn^2}{h_2^{1/3}} \tag{6}$$




**図–2** 界面の形状抵抗の概念図

ここで，$R_e=\frac{u_1h_1}{\nu}$，$F_d=\frac{u_1}{\sqrt{\epsilon gh_1}}$ である．さらに，摩擦勾配 $i_{f1}$，$i_{f2}$ は，

$$i_{f1}=\frac{f_i}{2gh_1}(u_1-u_2)|u_1-u_2| \tag{7}$$

$$i_{f2}=\frac{f_b}{2gh_2}u_2|u_2|-\frac{f_i}{2gh_2}(1-\epsilon)(u_1-u_2)|u_1-u_2| \tag{8}$$

として，運動の方程式に導入した．

### (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．

$$i_{fs}=\alpha\frac{C_D}{2g\Delta x}u|u| \tag{9}$$

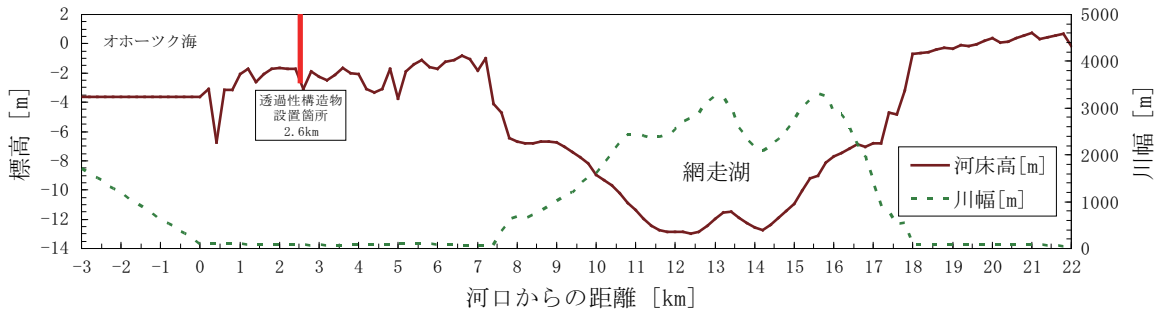
$$\alpha=1-\frac{\gamma}{100} \tag{10}$$

ここに，$C_D$：構造物の抗力係数，$\gamma$：構造物の透過率 [%] であり，$C_D$ は抗力測定実験[4]より平均値 $C_D$=1.41 とした．

### (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 層流の数理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




**図–3** 数値計算の河道条件 [河床高，川幅]

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–2** に示す．$\frac{\Delta h_2}{\Delta x}$ が界面勾配を表している．

$$i_{ft1} = \frac{if_t}{2gh_1}\frac{\Delta h_2}{\Delta x}(u_1 - u_2)|u_1 - u_2| \qquad (11)$$

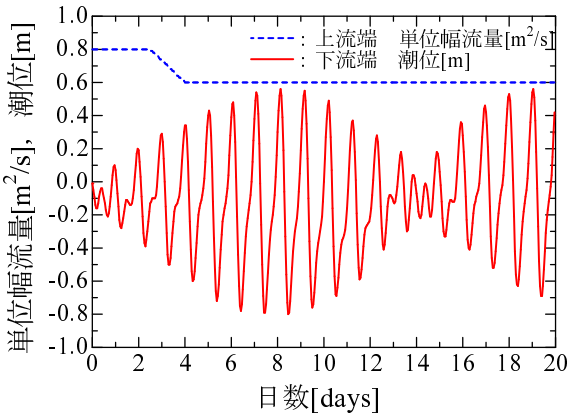
$$i_{ft2} = -\frac{if_t}{2gh_2}\frac{\Delta h_2}{\Delta x}(u_1 - u_2)|u_1 - u_2| \qquad (12)$$

ここに，$if_t$ は界面の形状抵抗係数である．界面の形状抵抗係数 $if_t$ 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 $if_t$=1.22 を与えている．この値は界面抵抗係数の算出において金子の式[6]を用いた場合の値である．

### (4) 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–3** に示す．計算区間は-3km～22km の 25km の区間である．計算期間は小潮と大潮を含む 2006 年 6 月 6 日 0:00～2006 年 6 月 26 日 0:00 の 20 日 (48 時間) とした．この期間において，現地では水位と塩分濃度の観測を行っている．境界条件は，上流端で淡水の単位幅流量を下流端で潮位を与えた．境界条件を**図–4** に示す．

上流端の淡水の単位幅流量について，網走湖へ




**図–4** 境界条件 (2006 年 6 月 6 日 0:00～2006 年 6 月 26 日 0:00)

流入する支川からの単位幅流量を計算では考慮していないため上流端で調整する事とし，観測値と計算値の塩分濃度が一致するように上流端の淡水の単位幅流量を与えた．上流端の塩水の単位幅流量は $q_2$=0.0[m$^2$/s] の一定値として与えた．

下流端の塩水水深は次式[7]で表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．

$$h_2 = HZ - h_1 - Z \qquad (13)$$

$$h_1 = F_{io}^{2/3} \times (HZ - Z) \qquad (14)$$

$$F_{io} = \frac{q_1}{\sqrt{\epsilon g(HZ - Z)^3}} \qquad (15)$$

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 [m$^2$/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 15[℃] とし，塩分濃度は淡水 2[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] の平均値として決定した．マニ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ニ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，粒径により事前に算出した．平均粒径は観測データより 24mm を与えた．計算に用いたマニングの粗度係数は，事前に求めた計算区間および期間中の平均値 $n$=0.017 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 $\Delta t$ は CFL 条件を満たすように次式から算出した．

$$\Delta t = \frac{C_r \Delta x}{u_{max} + \sqrt{g h_{max}}} \tag{16}$$

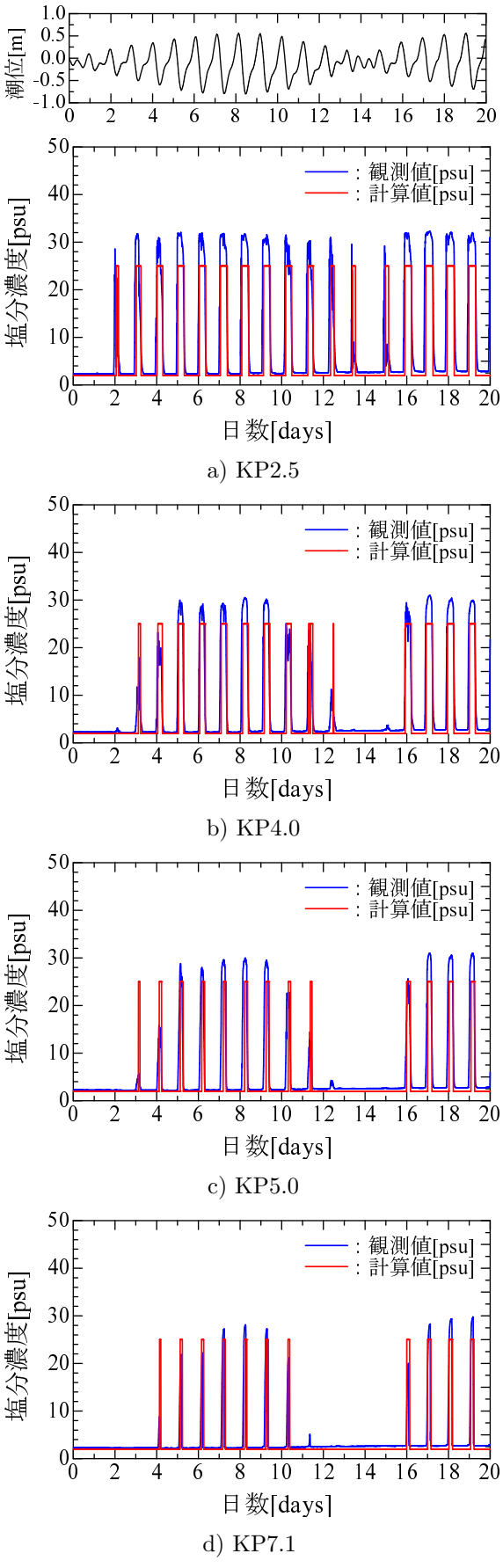
ここで，$u_{max}$：ある時刻の計算区間内における淡水または塩水の最大流速 [m/s]，$h_{max}$：ある時刻の計算区間内における淡水または塩水の最大水深 [m]，$C_r$：クーラン数，$C_r$=0.06 とした．

## 3. 数理モデルの妥当性

長期間を対象とした計算結果の妥当性を確認するために，小潮と大潮を含む 20 日間 (2006 年 6 月 6 日 0:00～2006 年 6 月 26 日 0:00) の数値計算を行い観測値との比較を行った．期間の選定理由は，問題を簡単にするために「やな」が撤去されている期間かつ上流からの流量変動が小さい期間として選定した．

### (1) 観測値と計算値の比較

観測値は，河口から湖口の区間 KP2.5，KP4.0，KP5.0，KP7.1 の 4 箇所において 10 分毎に観測された塩分濃度と水位を用いた．この 4 箇所における観測値と計算値の比較を，塩分濃度において**図–5** に，水位において**図–6** に示す．なお，塩分濃度の観測値の観測位置は水面下 50cm であり，塩分濃度の

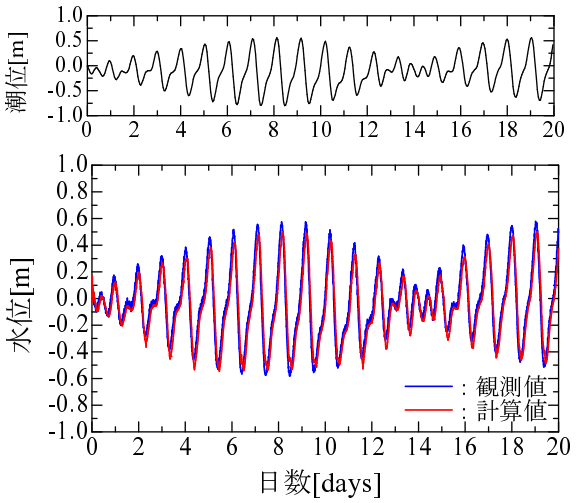



**図–5** 塩分濃度の観測値と計算値

計算値は，水面下 50cm が上層である場合は 2[psu]，下層である場合は 25[psu] の値となる．

**図–5a)KP2.5** の塩分濃度の観測値において，横軸の塩分の遡上時間に着目すると，大潮時の方が小潮時に比べて遡上時間が長い．**図–5b),c),d)** の観測値において，遡上時間は上流へ行くほど短い．計算値と観測値との比較においては，大潮時，小潮時いずれの場合も遡上時間が一致しており，かつ遡上開始時間と終了時間もよく一致している．

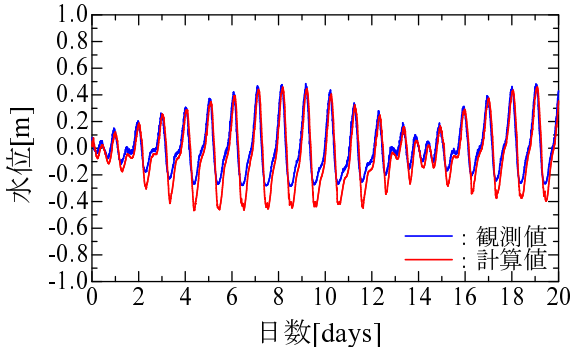
**図–6a)KP2.5** において，水位の観測値と計算値はよく一致している．**図–6b),c)** においては，上げ潮，満潮，下げ潮の期間では観測値と計算値はよく一致しているが，干潮の期間の計算値は観測値に比べて水位が低い．**図–6d)** においては，計算期間において計算値は観測値に比べて水位が低く，その差を平均すると 7.8cm である．特に，大潮期間よりも小潮期間の方が水位が低い．**図–6b),c)** の KP4.0 と KP5.0 において干潮時に計算値の水位が下がりすぎる原因として，この地点において現地よりも粗度を小さく与えすぎたか，または蛇行河道が影響し干潮時には粗度が大きくなる事が考えられるが，原因は明確になっていないため，今後現地観測データを含めた検討が必要である．**図–6d)** の KP7.1 における計算値の水位が小さい原因は，上流端で与えた単位幅流量が小さすぎたものと推定される．上記のように水位の関しては一部の課題点が残っているが，本論文では塩水が網走湖へ流入するかどうかを議論しており，塩水遡上の遡上時間および遡上開始，終了時間が各地点でよく一致している事から，塩水遡上に関しては，本研究で構築した数理モデルの長期間の計算結果は妥当であると判断し検討を進めた．



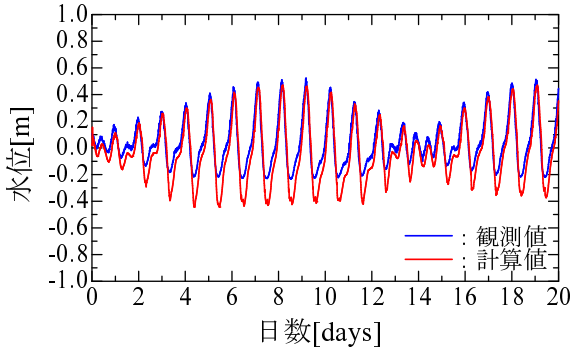




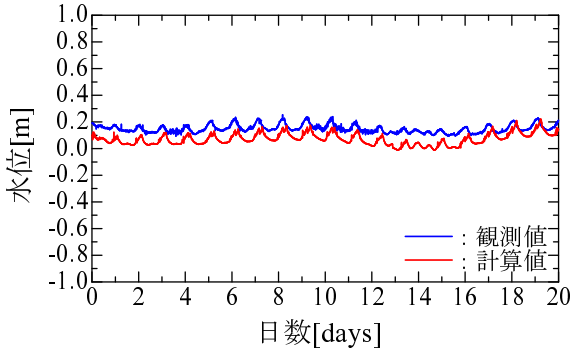
a) KP2.5




b) KP4.0




c) KP5.0




d) KP7.1

**図–6** 水位の観測値と計算値

## 4. 透過性構造物の抑制効果

本節では本研究で構築した数理モデルを用いて，前節と同様の期間 (2006 年 6 月 6 日 0:00～2006 年 6 月 26 日 0:00 の 20 日) を対象に，透過性構造物の透過率，設置箇所，設置数を変えた場合の塩水遡上抑制効果を明らかにした．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 80%の場合，100%の流水面積に対して 20%は構造物で 80%は通水孔となる．

### (1) 透過率の違いによる効果の違い

透過性構造物の透過率を 20%，40%，60%，80%，100%と変えて計算を実施した．各透過率の場合の網走湖へ流入した塩分量の累積値を**図–7a)** に示す．累積値は流量と $\Delta t$，塩分濃度から求めている．

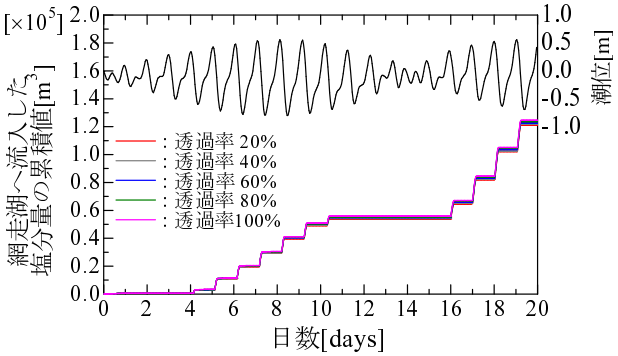
**図–7a)** より，大潮期間に網走湖へ塩水が流入しており小潮期間では流入していない．各透過率による流入塩分量の違いについては，累積値で比較すると違いが明確とならないため，透過率 100%(構造物が無い場合) を基準として各透過率が抑制した塩分量を縦軸に取り**図–7b)** に示す．縦軸の塩分量は (各透過率の流入塩分量) － (透過率 100%の流入塩分量) として算出しており，塩水抑制効果があるほど負の方向 (図では下方向) へ向かう．

**図–7b)** より，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．

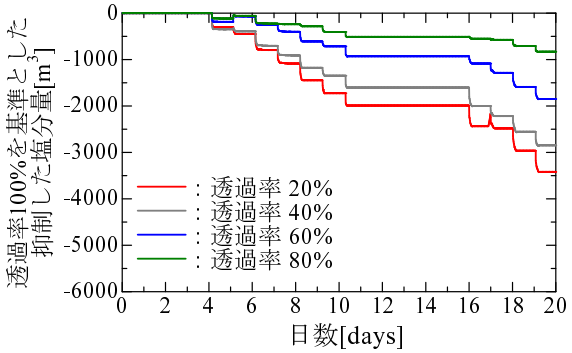
構造物の塩水遡上抑制効果について，構造物がない場合の網走湖に流入した累積塩分量を 100%とした場合，各構造物がある場合の網走湖に流入する累積塩分量は，97.3%（透過率 20%），97.7%（透過率 40%），98.5%（透過率 60%），99.3%（透過率 80%）であった．今回の数値計算結果から，構造物の目が細かいほど塩水遡上抑制効果があり，その程度を定量的に評価する事が出来た．

### (2) 設置箇所の違いによる効果の違い

透過性構造物の設置箇所の違いによる塩水遡上抑制効果の違いを明らかにするために，透過率を 50%




a) 流入塩分量の累積値



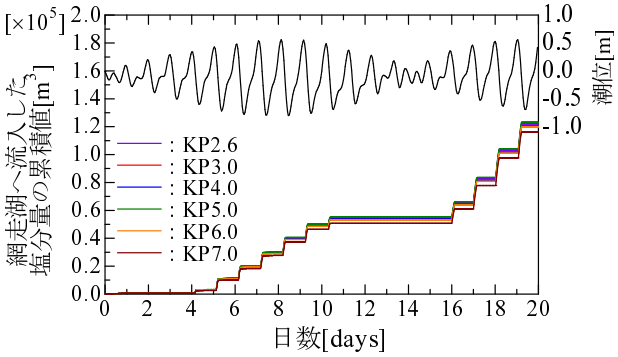

b) 抑制した塩分量

**図–7** 透過率の違いによる透過性構造物の抑制効果

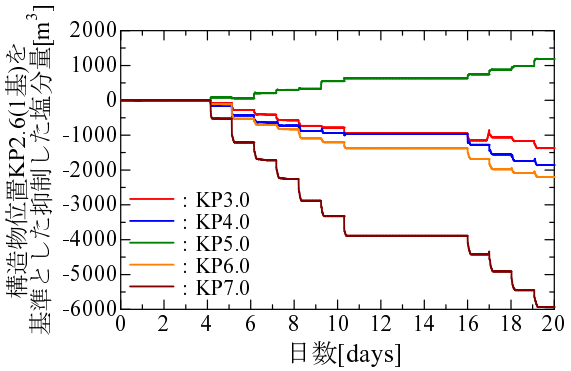
として透過性構造物の設置箇所を KP2.6，KP3.0，KP4.0，KP5.0，KP6.0，KP7.0 と変えて数値計算を実施した．各設置箇所での網走湖へ流入した塩分量の累積値を**図–8a)** に示す．

**図–8a)** より，各設置箇所での流入塩分量の違いについて，累積値で比較すると違いが明確とならないため，現地で設置している箇所 KP2.6 を基準として各設置箇所による抑制した塩分量を縦軸に取り**図–8b)** に示す．縦軸の塩分量は (各設置箇所での流入塩分量) － (設置箇所 KP2.6 での流入塩分量) 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–8b)** より，設置箇所 KP5.0 を除いて，上流に設置するほど塩水遡上抑制効果は大きい．KP5.0 の箇所について考察を行う．KP1.0 から KP4.8 の平均河床高は-2.21m，KP5.2 から KP7.0 の平均河床高は-1.37m でありその差は 84cm である．KP5.0 の平均河床高は-3.77m と縦断的にみて低くなっている事から KP5.0 は水面勾配が大きい箇所であると推定

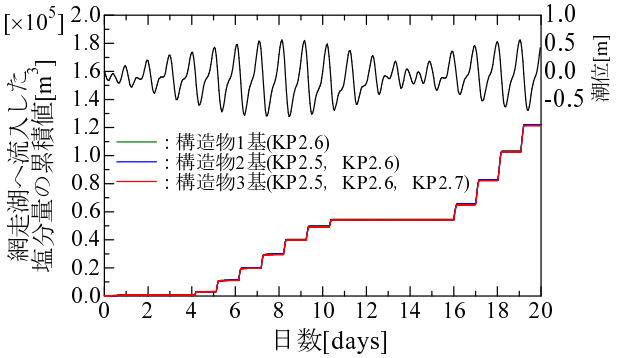



a) 流入塩分量の累積値

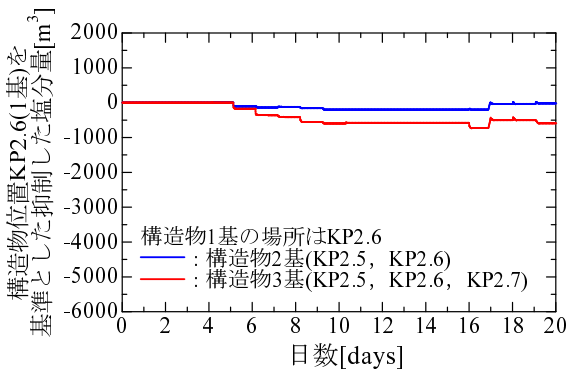



b) 抑制した塩分量

**図–8** 設置箇所の違いによる透過性構造物 (透過率 50%) の抑制効果




a) 流入塩分量の累積値




b) 抑制した塩分量

**図–9** 設置数の違いによる透過性構造物 (透過率 50%) の抑制効果

出来る．KP5.0 に構造物を設置した場合，設置しない場合に比べてさらに水面勾配が大きくなり上げ潮時には塩水が入りづらくなり，下げ潮時には構造物が抵抗となり上流の水位が上昇し流速が遅くなるため塩水が出づらくなると推察出来る．よって KP5.0 に構造物を設置した場合は，塩水が入りづらくなるがそれにも増して出づらくなるため，結果的に塩水遡上抑制効果は小さいと計算結果から推察出来る．

構造物の塩水遡上抑制効果について，設置箇所 KP2.6 での網走湖に流入した累積塩分量を 100%とした場合，各設置箇所での網走湖に流入する累積塩分量は，98.9%（KP3.0），98.5%（KP4.0），101.0%（KP5.0），98.2%（KP6.0），95.1%（KP7.0）であった．今回の数値計算結果から，設置箇所 KP5.0 を除いて，上流に設置するほど塩水遡上抑制効果があり，その程度を定量的に評価する事が出来た．

### (3) 設置数の違いによる効果の違い

透過性構造物の設置数の違いによる塩水遡上抑制効果の違いを明らかにするために，透過率を 50%として透過性構造物の設置数を 1 基 (KP2.6)，2 基 (KP2.5，KP2.6)，3 基 (KP2.5，KP2.6，KP2.7) と変えて数値計算を実施した．各設置数での網走湖へ流入した塩分量の累積値を**図–9a)** に示す．

**図–9a)** より，各設置数での流入塩分量の違いについて，累積値で比較すると違いが明確とならないため，現地の設置数の 1 基 (KP2.6) を基準として各設置数による抑制した塩分量を縦軸に取り**図–9b)** に示す．縦軸の塩分量は (各設置数での流入塩分量) − (1 基での流入塩分量) 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–9b)** より設置数を増やした方が塩水抑制効果は大きい．2 基設置の塩水抑制効果は，20 日目において 1 基設置とほぼ同程度となるが，5 日目から 17 日目の期間は 1 基設置よりも効果は大きい．しかし

17 日目において，**図–9b)** の縦軸の抑制した塩分量は正の方向へ向かっており，2 基設置の塩水抑制効果は 1 基設置よりも小さい．この理由として，2 基設置した事により塩水が入りづらくなるが逆に塩水は出づらくなると推察できるため，17 日目の水理量の条件が起因して，2 基設置の塩水抑制効果は 1 基設置よりも小さくなったと計算結果から推察出来る．

構造物の塩水遡上抑制効果について，設置数 1 基での網走湖に流入した累積塩分量を 100%とした場合，各設置数での網走湖に流入する累積塩分量は，99.98%（2 基），99.5%（3 基）であった．今回の数値計算結果から，設置数を増やした方が塩水遡上抑制効果は大きく，その程度を定量的に評価する事が出来た．

設置箇所と設置数の検討結果から，**図–8b)** と**図–9b)** より，構造物の設置数を増やすよりも，構造物の設置箇所を上流にした方が，塩水遡上抑制効果は大きいと言える．

## 5. まとめ

本研究により以下の事が明らかとなった．

1) 長期間の計算結果の妥当性を確認するために，小潮と大潮を含む 20 日間の数値計算を行い観測値との比較を行った．強混合型の塩水遡上の遡上時間および遡上開始，終了時間がよく一致しており，塩水遡上に関しては，本研究で構築した数理モデルの計算結果の妥当性を確認した．

2) 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り，設置箇所に関しては，KP5.0 を除いて上流に設置するほど塩水遡上抑制効果があり，設置数に関しては，設置数を増やした方が塩水遡上抑制効果は大きい．また，構造物の設置数を増やすよりも構造物の設置箇所を上流にした方が，塩水遡上抑制効果は大きい．


## 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ご尽力を頂きました．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，樫山和男，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) 吉川泰弘，安田浩保，渡邊康玄：格子状構造物の塩水遡上速度への影響，水工学論文集，第 51 巻，pp757-762，2007
5) 吉川泰弘，安田浩保，渡邊康玄：網走川における透過性構造物の塩水遡上への影響，河川技術論文集，第 13 巻，pp7-12，2007
6) 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.
7) 椿東一郎:水理学２，森北出版株式会社，pp.52，1996.
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.