

# 透過性構造物の塩水遡上量と塩水遡上距離への影響

IMPACT OF A MESH STRUCTURE  
ON THE SALINITY INTRUSION VOLUME AND DISTANCE

土木研究所寒地土木研究所 ○正会員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)  
正会員 渡邊 康玄 (Yasuharu Watanabe)  
正会員 安田 浩保 (Hiroyasu Yasuda)

## 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つである。網走川は河口から約7kmの位置に網走湖(周囲長42km, 最大水深16m)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、網走湖の塩水層は長年の人工・自然汚濁負荷が流入貯留され、富栄養化により酸素が消費され無酸素状態となっているうえ、塩水量が増加傾向にあるため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<sup>1)</sup>や河川横断方向に気泡を噴射する<sup>2)</sup>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」は出水時期には取外しが可能であり、「やな」の通水孔より小さい魚は通過できるため河川環境にも配慮していると言える。このため「やな」を用いた塩水遡上を抑制する対策法は、有力な代替案と言える。しかし、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。本研究では、水理実験および数値解析を併用して、透過性構造物の通水率と塩水遡上時の塩水遡上量および塩水遡上距離との関係を明らかにする。

## 2. 水理実験

水理実験は、本研究で用いた数値計算の妥当性を確認するための塩水遡上実験と、構造物の抗力係数を求めるための抗力測定実験の2種類の実験を行った。塩水遡上実験において数値計算の妥当性を確認する指標は、淡水と塩水の境界面(以下、界面)の位置と高さとした。

### (1) 塩水遡上実験

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。水路勾配は現地に合わせて水平とした。予備実験から求めたマンニングの粗度係数は



図-1 網走川感潮区間の平面図

表-1 塩水遡上実験の水理条件

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
実験中の平均水深 $H$ [cm]	10.35

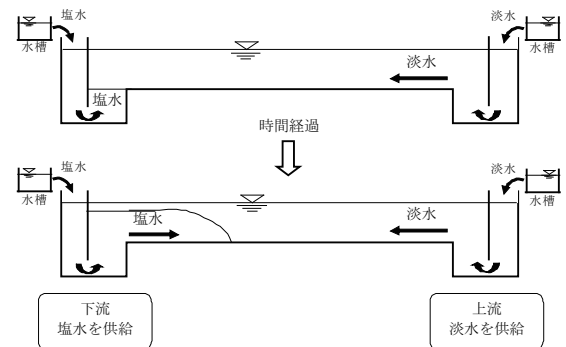


図-2 塩水遡上実験の概念図

0.011である。現地に対する水路模型縮尺 $\lambda$ は水深比から1/25である。

実験手順を図-2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て、着色された流体は塩水であると判断した。界面の位置と高さは、塩水遡上の流況を写真撮影し、この写真から界面が明瞭となるように画像処理を行い界面の位置と高さを読み取った。

実験の水理条件は、下層(塩水)が受ける重力の大きさ( $\epsilon g = g(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$ )を実験と現地で一致させて水理条件を決定した。ここに、 $g$ : 重力加速度  $9.8[\text{m/s}^2]$ ,  $\rho$ : 流体密度  $[\text{g/cm}^3]$ , 添え字1は上層(淡水), 2は下層(塩水)である。 $\epsilon$ を一致させる事により、フルード

表-2 抗力測定実験の水力条件

	Q [m <sup>3</sup> /s]	H [m]	Re
CASE 1	0.045	0.096	4.5 × 10 <sup>4</sup>
CASE 2	0.071	0.124	7.1 × 10 <sup>4</sup>
CASE 3	0.105	0.152	10.4 × 10 <sup>4</sup>
CASE 4	0.146	0.183	14.6 × 10 <sup>4</sup>

Q：流量，H：水深，Re：レイノルズ数 (=UH/ν)  
 U：流速 [m/s]  
 ν：動粘性係数 1.003 × 10<sup>-6</sup> [m<sup>2</sup>/s] (水温 20 °C)  
 現地 Re：3.0 × 10<sup>4</sup> ~ 299.1 × 10<sup>4</sup>

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、2003 年 12 月の現地観測結果より 0.036 であった。流体密度 ρ は、knudsen の式より水温と塩分濃度から求めた。塩水遡上実験の水力条件を表-1 に示す。

(2) 抗力測定実験

網走川の透過性構造物である「やな」は、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るため、本研究では簡便のため格子状構造物として扱った。抗力測定実験では、通水率の異なる 3 つの格子状構造物の抗力係数を求めた。ここで言う通水率とは、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。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。

実験水路はガラス水路 (長さ 25m × 幅 1m × 高さ 1m) を用い、水路勾配を 1/500 とした。水路底面のマンングの粗度係数は、予備実験より 0.019 である。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 3 種類の構造物を入れて、計 12 回 (4 ケース × 3 種類) の実験を行った。表-2 に水力条件を示す。流速の測定は電磁流速計 (ACM300-A, アレック電子 (株)) を用いた。

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。抗力測定は、水路側壁の影響を控除するために、構造物を縦方向に 3 分割して中央の構造物上部で測定を行った。抗力測定機器は、3 分力計 (LMC-3502-10WP, 日章電気 (株)) を用いた。

a) 構造物の抗力係数

実験結果から構造物の抗力係数 C<sub>D</sub> を次式で求めた。

$$C_D = \frac{2D}{\rho AU^2}$$

D:測定した抗力 [N], ρ:流体密度 [kg/m<sup>3</sup>], A:構造物の投影面積 [m<sup>2</sup>], U:構造物の直上流の流速 [m/s] である。構造物の抗力係数とレイノルズ数の関係を図-4 に示す。図中のレイノルズ数の d は構造物の直径 (d=4mm) である。図-4 より、どの通水率でも C<sub>D</sub> 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。以上より、構造物の抗力係数は、計 12 回の実験結果の平均をとり C<sub>D</sub>=1.4 とした。

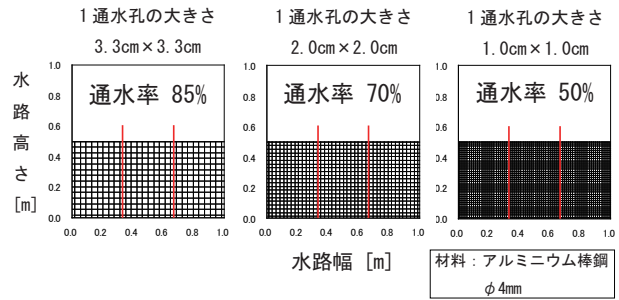


図-3 格子状構造物の緒元

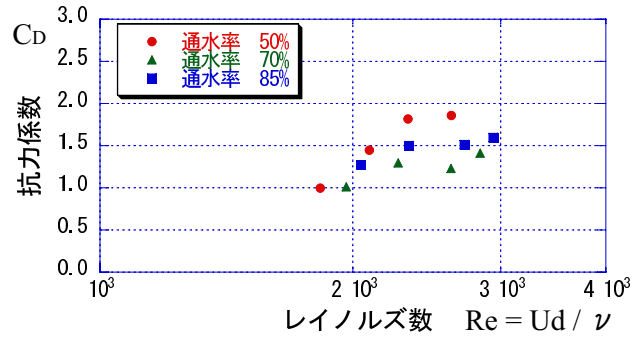


図-4 各通水率の C<sub>D</sub> と Re の関係図

3. 数値計算モデル

構造物による塩水遡上への影響を定量的に検討するために、1 次元 2 層流計算<sup>3)</sup>に、構造物の抵抗項および淡水と塩水の衝突による抵抗項を加えた以下の 4 つの式を用いた。数値解析法は不定流計算で一般に用いられる Leap Frog 法で解いている。

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial t} = E \tag{1}$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial q_2}{\partial t} = -E \tag{2}$$

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

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

i<sub>f1</sub>, i<sub>f2</sub>: 摩擦勾配は次式で表される。界面抵抗係数 f<sub>i</sub> と連行係数 E は Arita-Jirka<sup>4)</sup>による式から求めた。

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

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

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

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

$$E = |u_1 - u_2| \times$$

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

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

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

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

$$R_{e1} \geq 500 \text{ (乱流)} \quad \dots$$

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

ここで、 $h$ :水深 [m],  $q$ :単位幅流量 [ $m^2/s$ ],  $u$ :流速 [m/s],  $E$ :連行係数,  $i_0$ :河床勾配,  $i_{f1}$ ,  $i_{f2}$ :摩擦勾配,  $i_{fs}$ :格子状構造物の抵抗項,  $i_{ft}$ :塩水遡上時の先端の抵抗項,  $x$ :縦断距離 [m],  $t$ :時間 [s],  $n$ :マンシングの粗度係数, 添え字 1 は上層 (淡水層), 添え字 2 は下層 (塩水層) を表す。

(1) 塩水先端抵抗項

従来の計算モデル<sup>3)</sup>においては、計算断面で淡水層と塩水層が存在する場合の界面抵抗は、摩擦勾配  $i_{f1}$ ,  $i_{f2}$  で考慮されている。一方、塩水が遡上する最先端の部分では、界面抵抗だけではなく、塩水先端が淡水に衝突することによる抵抗が考えられる。塩水先端抵抗項を考慮していない従来の計算と実験の界面の高さを図-5 に示す。図より計算値は実験値と比較して塩水の遡上速度は速く、界面の高さは低くなっている。

本研究では、この抵抗を淡水と塩水の相対速度に比例すると仮定して次式の抵抗項の形で考慮した。

$$i_{ft1} = \frac{C_t}{2g\Delta x} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2|$$

$$i_{ft2} = -\frac{C_t}{2g\Delta x} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2|$$

先端抵抗係数  $C_t$  は、実験と計算の塩水先端位置において、その誤差が最小となる値  $C_t=0.93$  とした。先端抵抗項を考慮した計算と実験の界面の高さを時系列で図-6 a),b),c) に示す。計算値と実験値において、塩水先端位置および界面の高さが一致していることから、塩水先端抵抗項を考慮した数値計算モデルの妥当性が確認出来た。以後は、先端抵抗係数  $C_t=0.93$  として検討を進める。

(2) 構造物による抵抗項

構造物の通水率の違いによる塩水遡上への影響を検討するために、次式の構造物の抵抗項を数値計算モデルに加えた。構造物の抵抗項は、上層、下層ともに考慮している。

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

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

ここに、 $C_D$ :構造物の抗力係数,  $\gamma$ :構造物の通水率 [%] であり、 $C_D$  は抗力測定実験結果である図-4 より  $C_D=1.4$  とした。

4. 数値計算結果

構造物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。対象とする塩水遡上の現象は、塩水が河川に遡上する上げ潮時の場合とした。

数値計算の水利条件は、2003年12月25日9時から

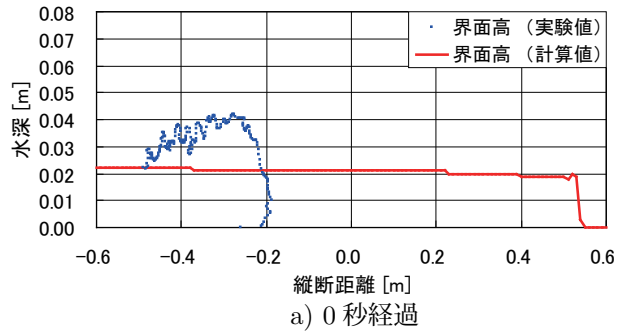


図-5 実験と計算の界面の高さ  $C_t = 0.0$

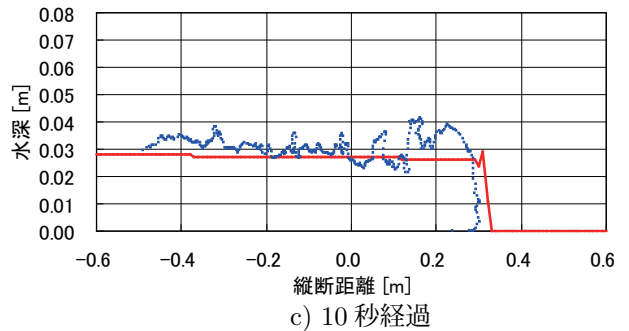
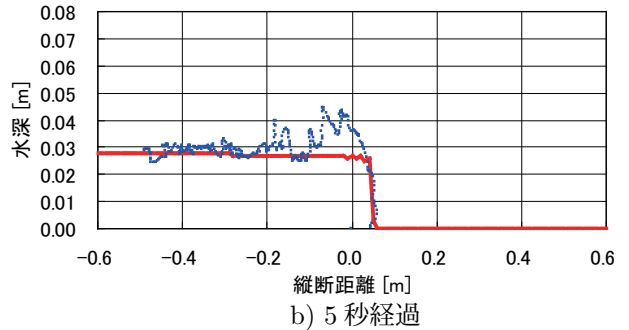
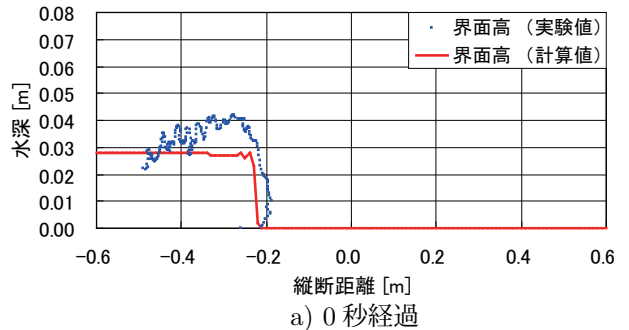


図-6 実験と計算の界面の高さ  $C_t = 0.93$

12月26日9時の大潮時の現地観測データを参考に設定した。計算時間は上げ潮時の半分の時間の1.5時間とした。下流端で与える塩水は、計算時間内に単位幅流量  $0.0m^2/s$  から  $0.3m^2/s$  および  $0.6m^2/s$  に増加させて与えた。上流端で与える淡水は、計算時間内に単位幅流量  $0.2m^2/s$  から  $0.0m^2/s$  に減少させて与えた。数値計算の水利条件を図-7 に示す。 $n$ :マンシングの粗度係数,  $\Delta x$ :計算距離間隔,  $\Delta t$ :計算時間間隔である。境界条件は上流端で淡水の単位幅流量  $q_1$  と塩水の水深  $h_2$ , 下流端で塩水の単位幅流量  $q_2$  と水位  $W_L$  を与えた。また幅は、単位幅  $1m$  とした。流体温度および塩分濃度は現地観測結果を与えて一定とし、格子状構造物は下流端から  $500m$  の位置に設置した。



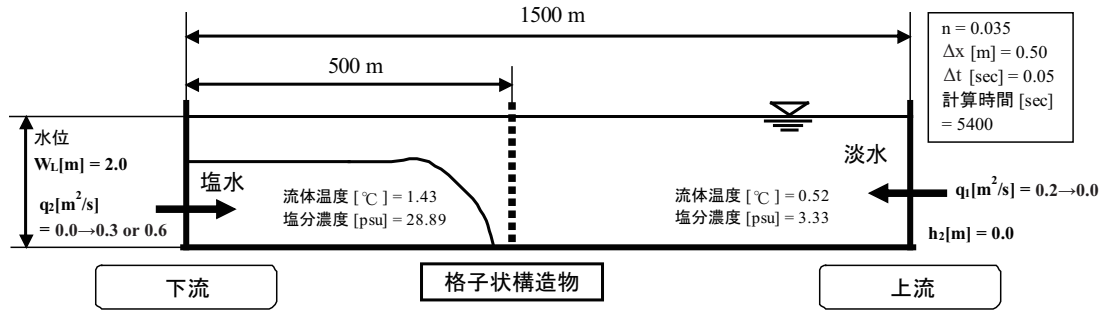


図-7 数値計算の水力条件

(1) 塩水遡上量と塩水遡上距離

塩水の単位幅流量の違いと構造物の通水率の違いによる塩水遡上への影響を、数値計算結果を用いて明らかにする。塩水遡上への影響として、塩水遡上量および塩水遡上距離に着目した。

塩水遡上量は、構造物がない場合の塩水遡上量  $Q$  と構造物がある場合の塩水遡上量  $Q'$  を用いて減少量 ( $Q' - Q$ ) で評価した。塩水遡上量は構造物設置位置より上流の塩水の遡上量とした。図-8 は、横軸に計算時間、縦軸に塩水遡上量の減少量を取り、塩水の単位幅流量を  $0.3\text{m}^2/\text{s}$ 、 $0.6\text{m}^2/\text{s}$ 、通水率を 40%、60%、80% と変えた場合の計算結果をプロットしている。図-8 から、塩水の単位幅流量 ( $q_2$ ) が同一の場合は、通水率が小さくなる程に塩水遡上量は減少する事が分かる。

塩水遡上距離は、構造物がない場合の塩水遡上距離  $L$  と構造物がある場合の塩水遡上距離  $L'$  を用いて減少距離 ( $L' - L$ ) で評価した。塩水遡上距離は下流端を 0m とし塩水の先端位置までの距離とした。横軸に計算時間、縦軸に塩水遡上距離の減少距離を取り図-9 に示す。図-9 から、塩水の単位幅流量 ( $q_2$ ) が同一の場合は、通水率が小さくなる程に塩水遡上距離は減少する事が分かる。この傾向は塩水遡上量の減少量と同様である。

塩水が構造物に到達するまでの時間については、図-8,9 から、塩水流量 ( $q_2 = 0.3\text{m}^2/\text{s}$ ) の場合で 3510 秒、塩水流量 ( $q_2 = 0.6\text{m}^2/\text{s}$ ) の場合で 2660 秒であり、塩水流量の大きい方が構造物に速く到達する。また、塩水流量の違いによる到達時間の違いに比べて、通水率の違いによる到達時間の違いは顕著ではない事が分かる。

次に、塩水が構造物を通過した後の塩水遡上量と塩水遡上距離の減少について、図-8,9 より減少勾配 (減少値 ÷ 時間) を指標として検討を行う。

図-9 から、塩水遡上距離の減少勾配は時間が経過するとともに小さくなる事が見て取れる。塩水遡上距離の減少について、塩水の先端流速は構造物通過時に減速するが、通過後の減速は顕著ではない事が分かる。図-8 から、塩水遡上量の減少勾配は塩水遡上距離の減少勾配に比べて大きくなる事が見て取れる。塩水遡上量の減少について、時間経過とともに塩水遡上距離の減少勾配が小さくなっているにも関わらず塩水遡上量の減少勾配が大きくなっている理由として、構造物上流の界面の高さについて、構造物がある場合の方が無い場合に比べて低くなるためである。上げ潮時において構造物による塩水遡上への影響は、界面への影響の方が塩

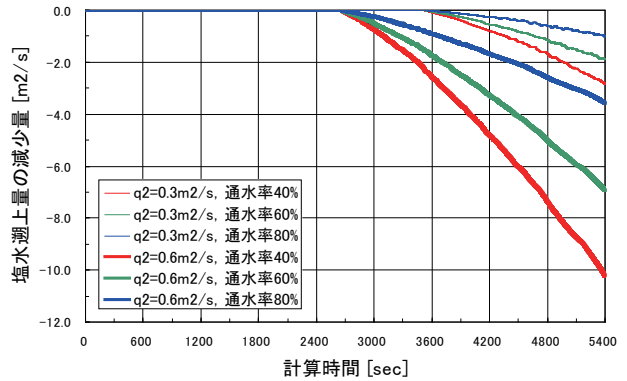


図-8 塩水流量と通水率の違いによる塩水遡上量の減少量

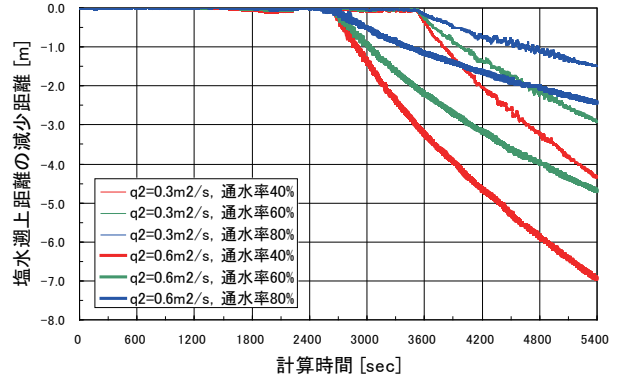


図-9 塩水流量と通水率の違いによる塩水遡上距離の減少距離

水の先端流速への影響に比べて大きい事が分かる。構造物の影響として、塩水遡上量への影響の方が塩水遡上距離への影響に比べて大きいと言える。

5. おわりに

本研究では、透過性構造物の抵抗項および淡水と塩水の衝突による抵抗項を加えた数値計算モデルを用いて、透過性構造物の塩水遡上への影響を明らかにした。上げ潮時において、透過性構造物による塩水遡上への影響は、塩水遡上量への影響の方が塩水遡上距離に比べて大きいと分かった。

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, 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, 1996
- 3) 須賀堯三: 感潮河川における塩水くさびの水利に関する基礎的研究, 土木研究所資料第 1537 号, pp.37-45, 1979.
- 4) 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