

網走川における透過性構造物の 塩水遡上への影響

IMPACT OF A MESH STRUCTURE ON SALINITY INTRUSION IN ABASHIRI RIVER

吉川 泰弘¹・安田 浩保²・渡邊 康玄²

Yasuhiro YOSHIKAWA, Hiroyasu YASUDA and 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 (〒 062-7602 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 (〒 062-7602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

On the Abashiri River 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. However, numerical calculations suggest that halfway between spring tide and neap tide, the seaward flow of fresh water is reduced by the permeable structure, which allows saline water in the river channel to intrude upstream into the lake.

Key Words : mesh structur, salinity intrusion, hydaluc experiment, numecal analyysis, abashiri river, abashiri lake

1. はじめに

北海道東部に位置する網走川は、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。網走湖は下層に塩水層、上層に淡水層を持つ汽水湖であり、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、無酸素状態である網走湖内の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、堰の設置¹⁾や気泡を河川横断方向に噴射する²⁾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。

著者らは「やな」を透過性構造物として扱い塩水遡

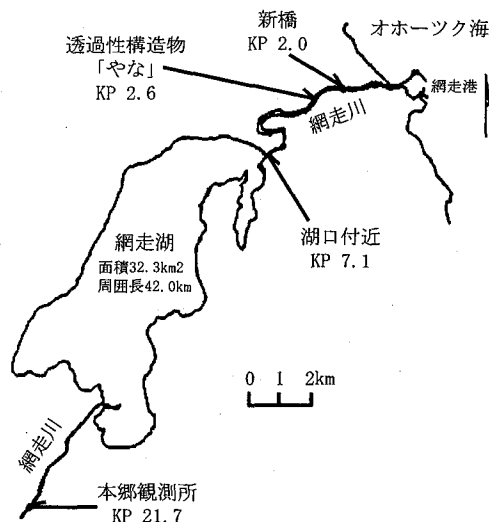


図-1 網走川と網走湖の周辺概要図

上への影響について水路実験⁴⁾および数値計算を用いた検討を行っている。その結果、下げ潮時においては、構造物の目が細かいほど塩水の流下速度が遅くなるため、構造物の上流側へ塩水が遡上して滞留している場合には、十分に掃流されず、塩水遡上抑制には不利となる事が示唆された。

本研究では、さらに一步踏み込み、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. 数理モデルの構築

本研究では、実河川における長期間にわたる塩水の浸入と遡上に関する変動を解析することを念頭におき、計算負荷の比較的小さい1次元2層流を塩水楔の数理モデルとした。まず、上層、下層に関する連続の式は、

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

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

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、

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

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

である。ここで、 h :水深[m]、 Q :流量[m³/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。 ϵ は、 g [m/s²]:重力加速度9.8、 ρ [g/cm³]:流体密度として次式で表せる。現地の ϵ は0.036程度である。

$$\epsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad (5)$$

(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。

$$f_i = 0.2 \times (Re F_d^2)^{-0.5} \quad (6)$$

$$f_b = \frac{2gn^2}{h_2^{1/3}} \quad (7)$$

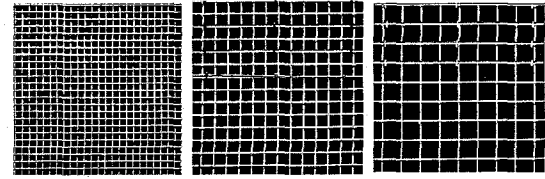


写真-1 透過性構造物

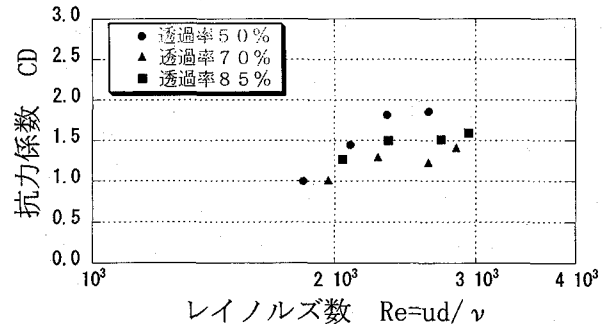


図-2 透過率のCDとReの関係図

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

$$i_{f1} = \frac{f_i}{2gh_1} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (8)$$

$$\begin{aligned} i_{f2} = \frac{f_b}{2gh_2} u_2 |u_2| \\ - \frac{f_i}{2gh_2} (1-\epsilon) (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \end{aligned} \quad (9)$$

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、 $10^2 \leq (Re F_d^2) \leq 6 \times 10^5$ である。このため、後述する本研究の実験に対しては、理論的に導かれた Arita-Jirka³⁾による式を用いている。

(2) 透過性構造物の抵抗⁴⁾

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。ここで言う透過率とは、横断面積に対する流水が流下可能な透過面積の率(%)である。透過率70%の場合、70%は透過面積で30%は構造物となる。

$$i_{fs} = \alpha \frac{C_D}{2g\Delta x} u |u| \quad (10)$$

$$\alpha = 1 - \frac{\gamma}{100} \quad (11)$$

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 は抗力測定実験より平均値 $C_D=1.41$ とした。抗力測定実験で用いた透過性構造物を写真-1に示し、抗力係数の実験結果⁴⁾を図-2に示す。

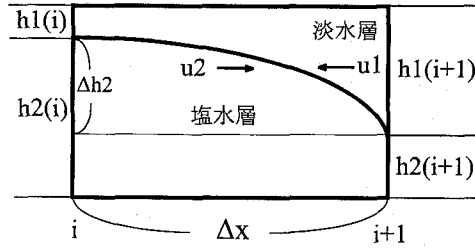


図-3 界面の形状抵抗の概念図

(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す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予見とされる。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-3に示す。 $\frac{\Delta h_2}{\Delta x}$ が界面勾配を表している。

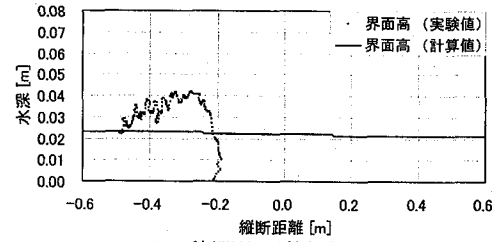
$$if_{t1} = \frac{if_t}{2gh_1} \frac{\Delta h_2}{\Delta x} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (12)$$

$$if_{t2} = -\frac{if_t}{2gh_2} \frac{\Delta h_2}{\Delta x} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (13)$$

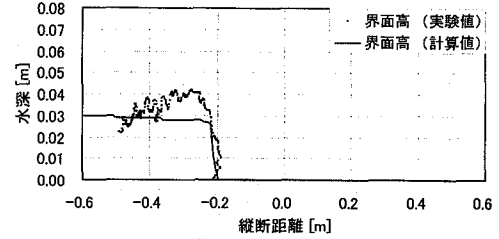
ここに、 if_t は先端部の形状抵抗である。

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⁴⁾の値を図-4 a'), a) に示す。先端部の形状抵抗を導入していない計算では、塩水楔の浸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-4 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。

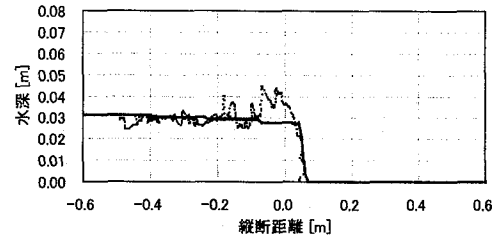
界面の形状抵抗係数 if_t は、実験と計算の界面の先端位置においてその誤差が最小となる値 $if_t=1.06$ とした。



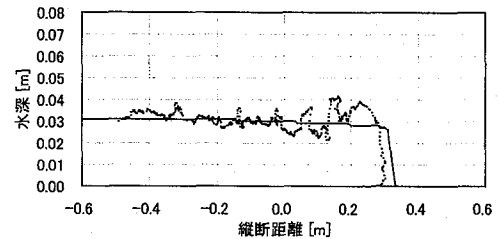
a') 0 秒経過 形状抵抗なし



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-4 界面の実験値と計算値 (構造物なし)

(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⁴⁾を図-5に示す。構造物の透過率は79%である。図-5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。本研究の数値モデルは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、本研究の数値モデルは実験レベルで妥当であると判断した。

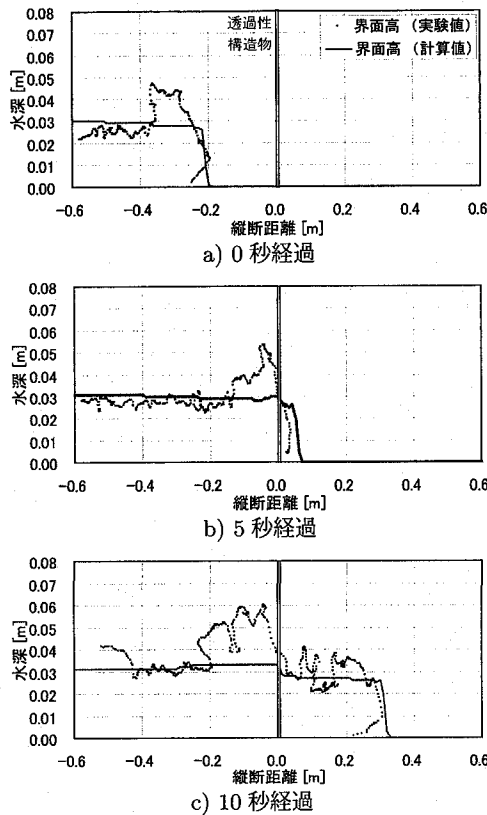


図-5 界面の実験値と計算値 (構造物あり)

3. 数値モデルの妥当性の検討

構築した数値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用いた。

(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-6に示す。計算区間は-3km~22kmの25kmの間である。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、上流端では流量、下流端では水位とした。淡水の上流端条件には $q_1 = 0.6 [\text{m}^2/\text{s}]$ を一定値として与え、塩水に関しては $q_2 = 0.0 [\text{m}^2/\text{s}]$ として与えた。

淡水の下流端境界条件には時刻潮位 [m] を与えた。一方で、塩水に関しては、次式で表される限界内部水深で与えた。

$$h_2 = HZ - h_1 - Z \quad (14)$$

$$h_1 = F_{io}^{2/3} \times (HZ - Z) \quad (15)$$

$$F_{io} = \frac{q_1}{\sqrt{eg(HZ - Z)^3}} \quad (16)$$

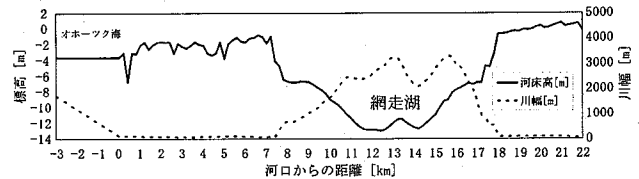


図-6 数値計算の河道条件 (河床高, 川幅)

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海へ伸ばしての箇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となる箇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 $0[\text{psu}]$, 塩水 $25[\text{psu}]$ とした。塩水 $25[\text{psu}]$ は、海の塩分濃度 $30[\text{psu}]$ と網走湖の塩水層の塩分濃度 $20[\text{psu}]$ の平均として決定した。

マン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ン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。

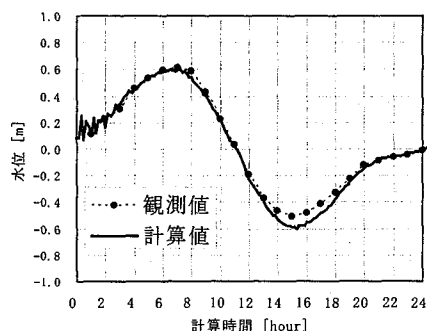
計算断面間隔 $\Delta x = 20[\text{m}]$, 計算時間ステップは $\Delta t = 0.15[\text{s}]$ とした。

(2) 実河川における観測値と計算値の比較

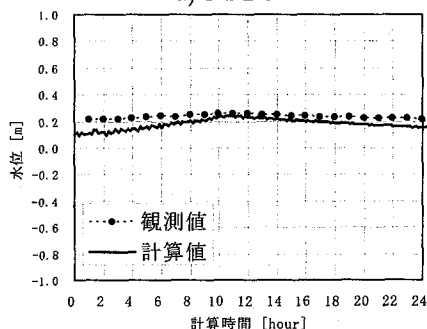
河口から湖口までの区間で下流側 (KP2.0 付近) と上流側 (KP7.0 付近) において、水位と淡水流速および塩水流速の観測値と計算値との比較を行い、実河川において構築した数値モデルの妥当性について検討した。

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-7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 $25[\text{psu}]$ を界面として淡水と塩水の区分けして、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-8に示す。図-8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



a) KP2.6



b) KP7.4

図-7 水位の観測値と計算値

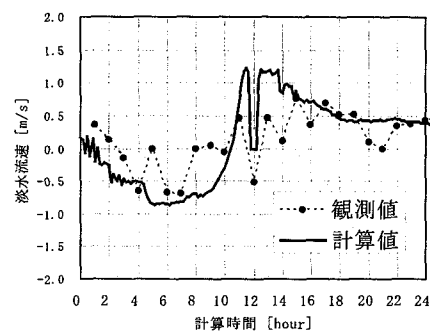
水は淡水に希釈されながら流下しているため、淡水と塩水の混合を無視した本モデルでは評価出来なかったものと考えられる。

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-9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-6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。

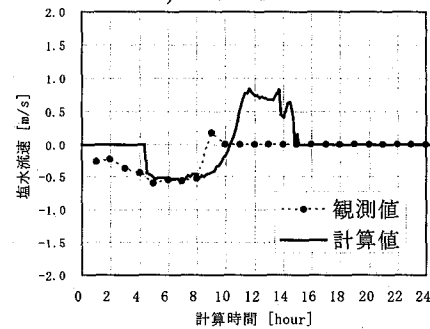
4. 透過率および潮汐規模による塩水遡上量の影響評価

(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時間の数値解析を構造物の透過率を変えて実施した。計算結果を図-10に示す。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。塩水抑制効果がある場合は累積塩分量は負の方向へ向かう。網走湖に塩水が流入する時間帯は、潮位ピーク時(7時間後)から下げ潮時(10時間後)の3時間であった。この塩水

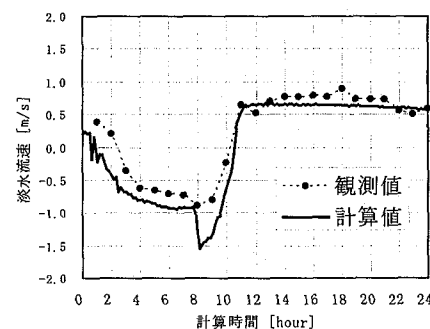


a) 淡水の流速

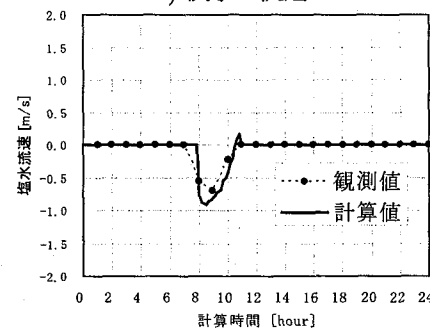


b) 塩水の流速

図-8 淡水流速と塩水流速の観測値と計算値 (KP2.0)



a) 淡水の流速



b) 塩水の流速

図-9 淡水流速と塩水流速の観測値と計算値 (KP7.1)

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

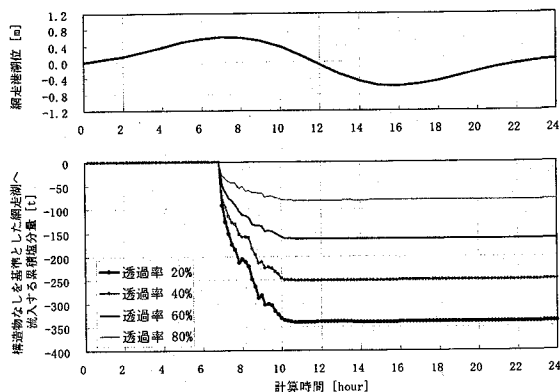


図-10 大潮 1 潮汐の透過性構造物の塩水抑制効果 (2003 年 1 月 19 日 9:00～2003 年 1 月 20 日 8:00)

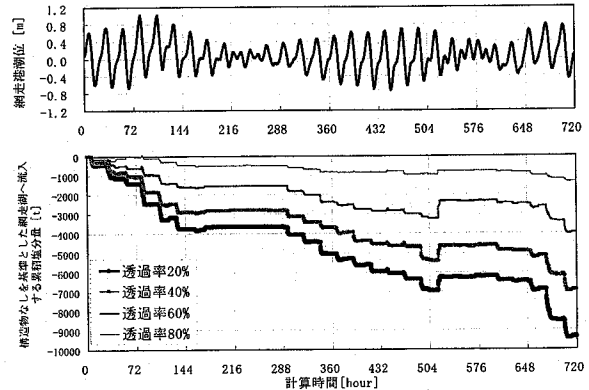


図-11 1ヶ月間の透過性構造物の塩水抑制効果 (2003 年 1 月 1 日 6:00～2003 年 1 月 31 日 5:00)

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。

(2) 小潮, 中潮, 大潮を含む 1ヶ月間の効果の相違

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、小潮や中潮では下げ潮時の塩水フラッシュ効果が小さく河道内に塩水が残留する事が考えられる。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。潮汐規模は、小潮→中潮→大潮→中潮→小潮と変化している。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-11 に示す。図-11 より、小潮→中潮→大潮の変化パターンでは塩水遡上抑制効果が大きい。一方、大潮→中潮→小潮の変化パターンでは塩水遡上抑制効果が小さい。特に大潮→中潮の変化パターンの塩水遡上抑制効果は、大潮で河道内に遡上した塩水が、塩水フラッシュ効果の弱い中潮の出現により塩水が河道内に滞留し網走湖に流入する現象が見て取れる。

5. おわりに

本研究により以下の事が明らかとなった。

- 1) 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 層流モデルに界面先端部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。
- 2) 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解析の結果、小潮→大潮では効果が大きく、大潮→小潮の変化パターンでは

効果が小さい事が分かった。特に大潮→中潮の変化パターンでは、大潮時に河道内に塩水が滞留し中潮で塩水のフラッシュ効果が弱くなるため網走湖に塩水が流入する現象が示唆された。

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御協力を頂いた。記して謝意を表します。

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) 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
- 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, 第 51 巻水工学論文集, 2007.
- 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) 須賀堯三: 感潮河川における塩水くさびの水理に関する基礎的研究, 土木研究所資料第 1537 号, pp.37-45, 1979.
- 7) 椿東一郎: 水理学 II, 森北出版株式会社, pp.201-202, 1974.
- 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, 2005.

(2007.4.5 受付)