

# 河川津波による塩水遡上現象に関する研究

吉川 泰弘<sup>1</sup>・阿部 孝章<sup>2</sup>・中津川 誠<sup>3</sup>・船木 淳悟<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 北見工業大学社会環境工学科 (〒 090-8507 北見市公園町 165)

E-mail: yoshi@mail.kitami-it.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 博(工) 寒地土木研究所寒地水圏研究グループ (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

E-mail: abe-t@ceri.go.jp

<sup>3</sup>正会員 博(工) 室蘭工業大学大学院くらし環境系領域 (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)

E-mail: mnakatsu@mmm.muroran-it.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 寒地土木研究所寒地水圏研究グループ (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

E-mail: funaki-j22aa@ceri.go.jp

本研究の目的は、河川津波の塩水遡上現象を解明することである。鉛直 2 次元計算モデルにより、津波高さ  
と河川流速が塩水遡上へ与える影響について検討した。1 次元 2 層流計算モデルにより、実河川における長期的  
な河川津波の塩水遡上現象について検討した。本計算モデルの妥当性は、実験値と計算値の比較により確認し  
た。本研究により以下の知見が得られた。1) 河川津波によって水位が上昇する場合、上昇した流体は必ずしも  
塩水ではない。2) 河川の水位を超える津波が遡上する場合には、河川水面を乗り上げて津波は遡上する。3) 津  
波の高さが高く河川の流れが遅いほど、塩水は上流へと遡上する。4) 河川津波による塩水先端位置は、第一波、  
第二波と津波が河川を遡上するタイミングで上流へと遡上し、引き波時には直ぐさま流下しない。

**Key Words:** river tsunami, salinity intrusion, vertical 2-dimensional model, 1-dimensional 2-layer model, experi-  
ment

## 1. はじめに

2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震による津波は、河川を遡上<sup>1)</sup>し被害を拡大させた。河川津波は、陸域よりも遡上距離が長くなる<sup>2)</sup>ため、その危険性が再認識されている。河川津波による被害の一つとして、河川内の取水口に塩水が流入し取水障害を引き起こす被害がある。災害初期段階においては、取水障害により上水道の機能が失われると人命に関わる事態となる。

北海道東部の太平洋に面する釧路市では、新釧路川の河口から 8.94km に位置する取水口において、市の全水源を取水している。2011 年 3 月 11 日は、取水口付近の河川水位が上昇したため、16 時 25 分から 18 時 30 分の 2 時間 5 分、19 時 35 分から 21 時 55 分の 2 時間 20 分の計 2 回の取水停止を実施している。また、釧路市では、3 月 11 日 16 時 00 分から 3 月 12 日 1 時 00 分の期間で、取水した水の塩分測定を計 28 回実施している。取水口付近の河川水位が上昇し津波の遡上が確認された状況であったが、測定結果から取水した水は全て淡水であった。18 万都市である釧路市は、全水源を 1 箇所から取水しており、取水障害は重要な問題となる。河川津波による塩水の遡上および流下の現象を把握することは、取水管理を行う上で重要な知見となる。

河川津波による塩水遡上に関する既往研究<sup>3)</sup>では、三次元塩水挙動解析を用いて数値計算を実施し、津波が

淀川を遡上する際の塩水遡上距離や塩分濃度変化を経時的に解析しており有益な知見が得られている。一方で、計算結果の妥当性の確認、河川津波の遡上と流下を含めた津波の発生から収束までの数日間の経時変化の検討の必要性を指摘している。

本研究は、河川津波の塩水遡上現象を解明することを目的として、数値計算モデルを構築し、計算モデルの妥当性を確認するための水理実験を実施して、計算値と実験値の比較を行った。本計算モデルを用いて、現象を理解するための数値実験、実河川における河川津波の遡上と流下を含めた数値計算を実施した。

## 2. 数値計算モデルの構築

塩水が急激に淡水を遡上する局所的な現象を理解するために、鉛直 2 次元計算モデルを構築した。実河川における河川津波の遡上と流下を含めた大局的な現象を理解するために、1 次元 2 層流計算モデルを構築した。

### (1) 鉛直 2 次元計算モデル

横断方向の流速はゼロ、流れ方向を X 軸、鉛直方向を Z 軸とした。連続の式は次式を用いた。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$u$ [m/s]: 流れ方向 (X 軸) の流速で上流方向を正とした。

$w$ [m/s]: 鉛直方向 (Z 軸) の流速で上空方向を正とした。

X 軸と Z 軸の運動の方程式は次式を用いた.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - g \quad (3)$$

$t$ [s]: 時間,  $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>]: 流体の密度,  $P$ [N/m<sup>2</sup>]: 圧力,  $\nu_x$ [m<sup>2</sup>/s]: 流れ方向の渦動粘性係数,  $\nu_z$ [m<sup>2</sup>/s]: 鉛直方向の渦動粘性係数,  $g$ [m/s<sup>2</sup>]: 重力加速度であり 9.8 を与えた. 圧力は, 式 (2) を  $x$  に関して偏微分した式と式 (3) を  $z$  に関して偏微分した式を加算し, 式 (1) の右辺を変数に置き換えた式を代入して導かれる Poisson 方程式により計算した. 解法は Gauss-Seidel 法を用いた.

$\nu_x$  は, リチャードソンの 4/3 乗則<sup>4)</sup> より次式とした.

$$\nu_x = 0.01(\Delta x)^{\frac{4}{3}} \quad (4)$$

式 (4) の単位について,  $\nu_x$  は cm<sup>2</sup>/s,  $\Delta x$  は cm である. なお,  $\Delta x$  は流れ方向の計算区間距離である.

$\nu_z$  は, 実験結果との比較<sup>5)</sup> から, 妥当性が確認されている次式の Munk & Anderson モデル<sup>6)</sup> を用いた.

$$\nu_z = \frac{\nu_0}{(1 + 10R_i)^{0.5}} \quad (5)$$

$\nu_0$ [m<sup>2</sup>/s]: 動粘性係数は,  $1.0 \times 10^{-6}$  とした.

$R_i$ : リチャードソン数は次式である.

$$R_i = \frac{g}{\rho} \left( \frac{d\rho}{dz} \right) \left( \frac{du}{dz} \right)^{-2} \quad (6)$$

$\rho$  は, 次式の流体密度の移流拡散方程式により求めた.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + D_z \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \quad (7)$$

$D_x$ [m<sup>2</sup>/s]: 流れ方向の渦動拡散係数,  $D_z$ [m<sup>2</sup>/s]: 鉛直方向の渦動拡散係数である.

$D_x$  は, 次式とした.

$$D_x = \nu_x \quad (8)$$

$D_z$  は, Munk & Anderson モデル<sup>6)</sup> の次式とした.

$$D_z = \frac{\nu_0}{(1 + 3.3R_i)^{1.5}} \quad (9)$$

$SS$ [psu]: 塩分濃度,  $\rho_w$ [kg/m<sup>3</sup>]: 淡水の密度とすると,  $SS$  と  $\rho$  は次式の関係がある.

$$SS = 1000 \times \frac{\rho - \rho_w}{\rho} \quad (10)$$

## (2) 1次元2層流計算モデル

水位, 淡水流速, 塩水流速の観測値と計算値との比較からモデルの妥当性が確認されている1次元2層流計算モデル<sup>7)</sup> とした. 本計算モデルは, 淡水層と塩水層の区分は密度界面としており, 淡水と塩水が混合する汽水性の流体は再現できないが, ある濃度の塩水がどこまで河川を遡上するかを計算することができる.

淡水層の連続の式は式 (11), 塩水層の連続の式は式 (12) である. 淡水層の運動の方程式は式 (13), 塩水層の運動の方程式は式 (14) である.

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q_1}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q_2}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + g \left( \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) + gi_{f1} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + g \left( \frac{\partial (1 - \epsilon) h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - i_0 \right) + gi_{f2} = 0 \quad (14)$$

$$\epsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad (15)$$

$h$ [m]: 水深,  $Q$ [m<sup>3</sup>/s]: 流量,  $B$ [m]: 川幅,  $i_0$ : 河床勾配,  $i_f$ : 摩擦勾配である. 添え字 1 は上層(淡水層), 添え字 2 は下層(塩水層)を表す. 流体の密度  $\rho$  は, 次式の Knudsen の式で計算した.

$$\rho = \sigma_t / 1000 + 1 \quad (16)$$

$$\sigma_t = \sum + (\sigma_0 + 0.1344) [1 - A_t + B_t (\sigma_0 - 0.1324)] \quad (17)$$

$$\sum = - \left[ (T - 3.9)^2 (T + 283.0) \right] / \left[ (503.570)^2 (T + 67.26) \right] \quad (18)$$

$$\sigma_0 = -0.069 + 1.4708C_L - 0.001570C_L^2 + 0.0000398C_L^3 \quad (19)$$

$$A_t = T (4.7869 - 0.098185T + 0.0010843T^2) 10^{-3} \quad (20)$$

$$B_t = T (18.030 - 0.816400T + 0.0166700T^2) 10^{-6} \quad (21)$$

$T$ [°C]: 水温,  $C_L$ [psu]: 塩分濃度である. 淡水と塩水の水温は 4 °C, 塩分濃度は 30psu を与えた.

摩擦勾配  $i_{f1}$ ,  $i_{f2}$  は, 式 (22), 式 (23) とした.

$$i_{f1} = \frac{f_i}{2gh_1} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (22)$$

$$i_{f2} = \frac{f_b}{2gh_2} u_2 |u_2| - \frac{f_i}{2gh_2} (1 - \epsilon) (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (23)$$

$f_i$  は界面抵抗係数,  $f_b$  は河床粗度の抵抗係数である.

$f_i$  は, 次式の上層のフルード数とレイノルズ数を用いた金子の式<sup>8)</sup> とした.

$$f_i = 0.2 \times (Re F_d^2)^{-0.5} \quad (24)$$

$$Re = \frac{u_1 h_1}{\nu_0}, \quad F_d = \frac{u_1}{\sqrt{\epsilon g h_1}}$$

式 (24) 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, 適用範囲は,  $10^2 \leq (Re F_d^2) \leq 6 \times 10^5$  である.

$f_b$  は, マニングの式を用いた次式とした.

$$f_b = \frac{2gn^2}{h_2^{1/3}} \quad (25)$$

$n$ [s/m<sup>1/3</sup>] 式は, マニングの粗度係数である.

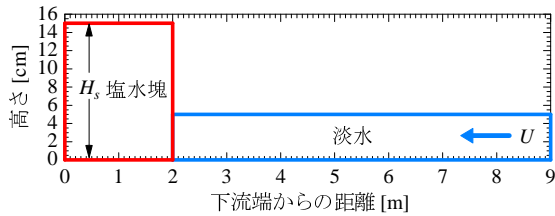


図-1 実験水路および計算領域の概要

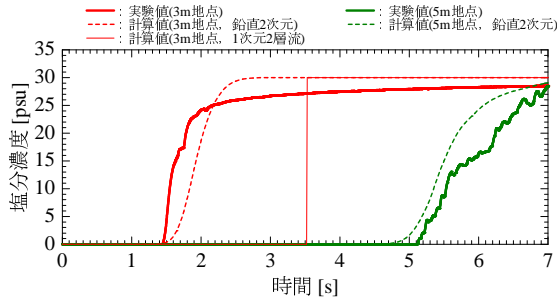


図-2 実験値と計算値の塩分濃度の時間変化 (3m地点と5m地点, ゲート引き上げ時は0秒)

(3) 実験値と計算値の比較

実験水路および計算領域の概要を図-1に示す。水路延長は9m, 水路幅は20cm, 河床勾配はゼロである。H<sub>s</sub>は下流側の塩水塊の高さ, Uは上流から下流への淡水の流速である。塩水と淡水の境界には, 幅1cmのアクリル板を設置し, この板を引き上げるにより塩水を淡水側へと遡上させる。実験および計算の初期条件は, H<sub>s</sub>=15cm, U=0cm/s, 塩水塊長は2m, 塩分濃度30psu, 淡水水深5cmとした。塩水塊は海域からの津波を想定している。下流端から3mと5mの地点において, 水路床から上方向に1.5cm離れた位置に, 塩分濃度計および水位測定用の圧力計を設置し, 実験値を測定した。鉛直2次元計算では, Δx=2.0cm, Δz=0.5cm, 1次元2層流計算では, Δx=2.0cmとした。

実験値と計算値の塩分濃度の時間変化を図-2に示す。3m地点の塩水遡上時刻は, 実験値で1.6秒, 鉛直2次元の計算値で1.6秒と一致した。1次元2層流の計算値は3.5秒であり1.9秒遅れて遡上した。5m地点の塩水遡上時刻は, 実験値で5.5秒, 鉛直2次元の計算値は5.0秒であり0.5秒速く遡上した。1次元2層流計算では, 30psuの塩水は5m地点まで遡上しない結果であった。

図-3, 4に, 実験値と計算値の水位の時間変化を示す。鉛直2次元計算は, 3m地点と5m地点の水位の昇降を再現している。1次元2層流計算は, 3m地点では0.3秒の遅れ, 5m地点では0.6秒の遅れで水位が上昇した。図-3の1次元2層流計算の水位において, 約1.0秒と約3.5秒で高周波の振動成分が現れている。本計算モデルの移流項は, 1次風上差分で解いており, 2次の拡散成分を無視しているため, 波峰先端部において分散成分が卓越したと考えられる。また, 約3.5秒の時刻に塩水が遡上しており, 本計算モデルは淡水と塩水を分離して計算しているため, 塩水遡上時にも波峰先端

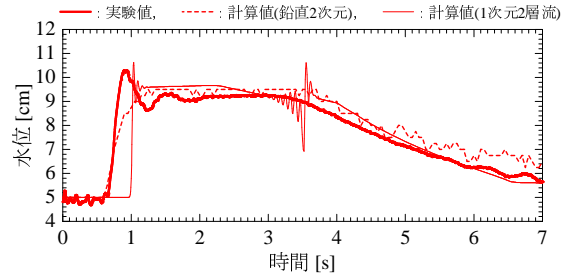


図-3 実験値と計算値の水位の時間変化 (3m地点)

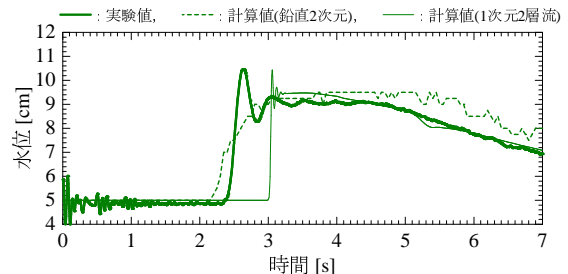


図-4 実験値と計算値の水位の時間変化 (5m地点)

表-1 数値実験条件

| 単位    | cm, cm/s | 実験 H <sub>s</sub> | 実験 U | 現地 H <sub>s</sub> | 現地 U |
|-------|----------|-------------------|------|-------------------|------|
| case1 |          | 10                | 5    | 200               | 22.4 |
| case2 |          | 15                | 5    | 300               | 22.4 |
| case3 |          | 15                | 15   | 300               | 67.1 |

部に高周波の振動が現れたと考えられる。

実験値と計算値との比較から, 鉛直2次元計算は, 塩水の遡上時刻と上昇, 水位の昇降を良く再現した。一方で, 1次元2層流計算は, 30psuの高濃度の塩水を計算しているため, 塩水遡上時刻が遅れて計算された。水位の上昇も遅れて計算され, 本検討では, 鉛直2次元計算よりも精度が低いことが分かった。

本実験の再現計算に要した時間は, 鉛直2次元計算は3632秒, 1次元2層流計算は14秒であり約260倍の差があった。使用したパソコンは, Intel Core i7-3960X CPU 3.30GHzのプロセッサを搭載している。鉛直2次元計算は, 1次元2層流計算に比べて高い精度で現象を把握できるが計算時間が長い。1次元2層流計算は, 鉛直2次元計算に比べて精度が低い計算時間が短い。両計算モデルは, 上記の長所と短所を持っており, 相互に補える関係にある。

実務で利用する際には, 災害前には, 鉛直2次元計算もしくは, 精度を低くしても計算時間を短くする場合は1次元2層流計算を用いて, 想定される条件で予測計算を行い現象を把握する。災害時には, 地震発生から河川津波到達までの時間は短く, 想定した条件と実際の条件が必ずしも一致するとは限らないため, 1次元2層流計算を用いて, 実際の条件または予測された条件でリアルタイムで現在の現象を把握し, 取水停止の判断基準を得ることが出来る。さらに, 災害後の取水施設の点検や整備等を実施する際の判断基準となり, 迅速に作業に取り掛かることが可能となる。

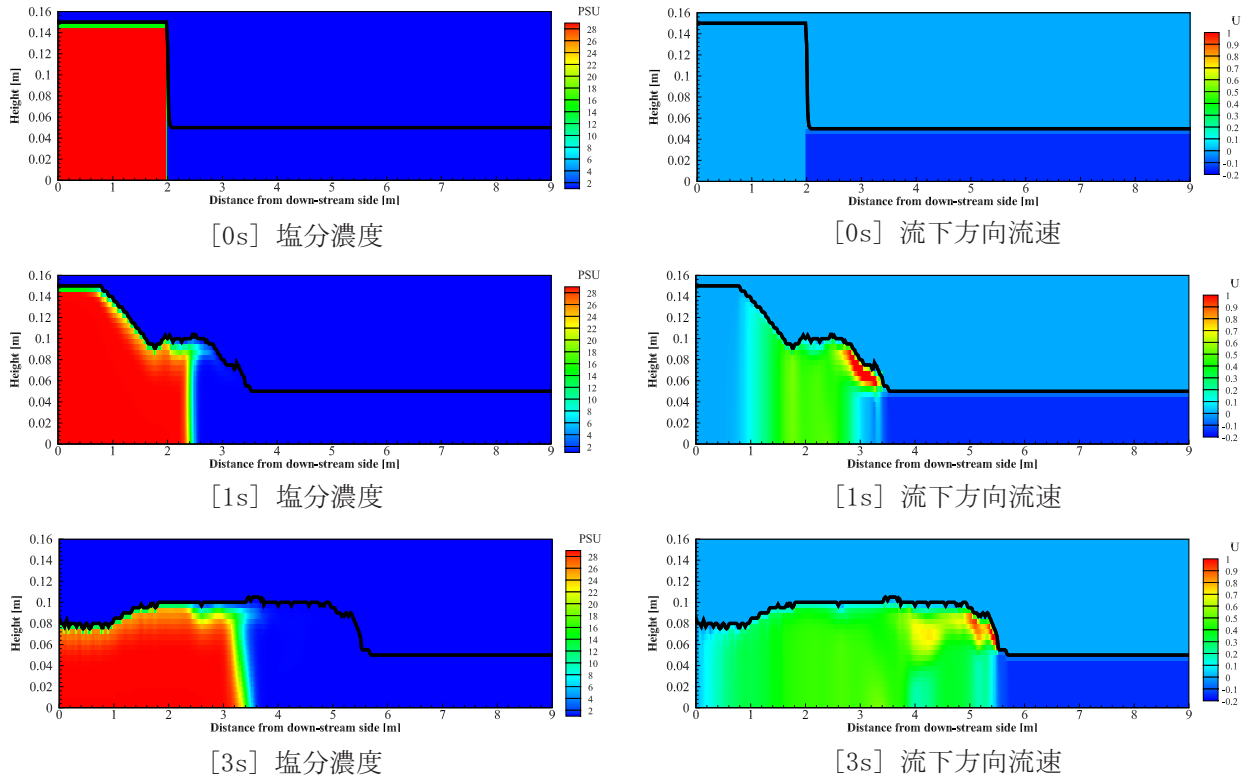


図-5 塩分濃度 [psu] と流下方向流速 [m/s] における鉛直 2 次元計算モデルの計算結果 (case3)

### 3. 鉛直 2 次元計算モデルを用いた数値実験

#### (1) 数値実験条件

数値実験条件および現地換算した値を表-1 に示す。新釧路川の河口での水深を 1m とすると、数値実験の縮尺は 1/20 となる。なお、2011 年 3 月 11 日の新釧路川河口の海域での津波の最高遡上高は 210cm である。

#### (2) 計算条件

X 軸方向の計算区間は、図-1 の区間からさらに 41m 長い区間の計 50m とし、計算距離間隔  $\Delta x$  は 2.0cm とした。Z 軸方向の計算区間は、計 16cm とし、 $\Delta z$  は 0.5cm とした。計算時間は、計 7 秒とした。計算時間間隔  $\Delta t$  は、CFL 条件を用いてクーラン数を 0.2 として計算した。

#### (3) 河川津波の塩水遡上現象に関する考察

数値実験条件の規模が大きい case3 において、0 秒、1 秒、3 秒毎の塩分濃度と流下方向流速を図-5 に示す。図中の黒の実線は、大気と流体の境の水面である。

図-5 の塩分濃度より、赤で示された塩水塊が、1 秒後には、重力の影響により鉛直下方向へと流れる。塩水遡上地点の先端において、水路床に比べて水面では、塩水が混合し希釈されている。3 秒後には、塩水は上流方向へと遡上し、水面は上昇する。塩水遡上地点の先端における鉛直塩水濃度分布は、水面に比べて水路床の塩水濃度が高い。上流側の水面が上昇している区間の塩分濃度をみると、塩水は遡上していないことが分

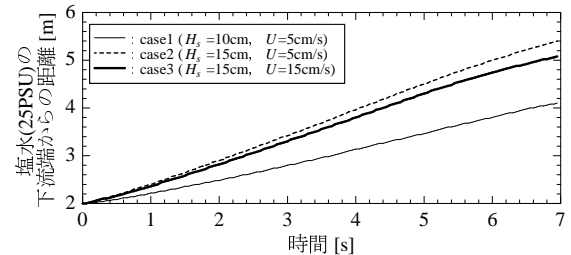


図-6 各 case における塩水遡上距離の時間変化

かる。塩水遡上速度は 62.5cm/s、縦断的な水面上昇速度は 146.2cm/s であり、塩水遡上速度の方が遅い。

図-5 の流下方向流速より、1 秒後には、水位上昇地点の先端において、水路床に比べて水面では、上流方向の流速が速くなっており、この流体は下流へ流れる淡水の水面上を乗り上げている。3 秒後には、時間経過に伴って、この流体が水面上を遡上し水位は上昇する。

本検討結果から、河川津波によって水位が上昇する場合、上昇した流体は必ずしも塩水であるとは言えず、上流域ほど塩水は希釈されることが分かった。また、上流からの流れがある流況に、この流れの水位を超える塩水が遡上する場合には、上流から流れる淡水の水面上を乗り上げて遡上する。

#### (4) 塩水高 $H_s$ と淡水流速 $U$ が塩水遡上に与える影響

各 case において、25psu の塩水の遡上距離の時間変化を図-6 に示す。塩水高  $H_s$  が高い case2 は、case1 に比べて塩水遡上距離が長く、塩水遡上速度は速い。淡水流速が遅い case2 は、case3 に比べて塩水遡上距離が長く、塩水遡上速度は速い。本検討結果から、塩水塊の高



さが高く上流からの淡水の流れが遅いほど、塩水は上流へと遡上し塩水遡上速度は速くなることが分かった。

#### 4. 1次元2層流計算モデルの実河川への適用

2011年3月11日の新釧路川において、実際の計算時間が短く、実河川における河川津波が無い場合の塩水遡上現象を1ヶ月程度の長期間にわたり再現し、計算モデルの妥当性が確認<sup>7)</sup>されている1次元2層流計算を用いて、水位の観測値と計算値の比較、塩水遡上の再現性の検討を行い、河川津波の塩水遡上現象の解明を試みた。本計算に要した実時間は約2秒であった。

##### (1) 2011年3月11日の新釧路川の河川津波

新釧路川の概況を図-7に示す。釧路川は湿原地帯を蛇行しながら南下して太平洋に注ぐ。河床勾配は、釧路湿原から新釧路川河口部までが1/8000~1/3000程度である。取水口は、図-7より河口から8.94km上流に位置している。なお、図-7のKPとは河口からの距離である。2011年3月11日の新釧路川の河川津波は、阿部ら<sup>9)</sup>の報告によると、第一波の最大水位の時刻は、鳥取で15時59分、広里16時21分、岩保木16時45分であり、9.9kmを46分で遡上した。この期間に取水停止が行われている。最大波の到達時刻は、鳥取11日23時40分、広里12日00時02分、岩保木12日00時27分であり、9.9kmを47分で遡上している。この期間には取水停止は行われていない。

##### (2) 計算条件

計算区間は、河口より沖合に1km離れた地点から河口より24km上流の計25kmの区間とした。計算時間は、2011年3月11日14時00分から3月11日23時45分の計9時間45分とした。計算終了時刻を3月11日23時45分とした理由は、この時刻に最大波が到達しており、その後、下流端の境界条件である釧路港の潮位データが欠測したためである。平均河床高を河床高、低水路幅を川幅とした。KP-1.0からKP0.0は、海域を想定し、KP-1.0で河床高-3m、川幅1kmとしてKP0.0にすりつけた。KP0.0からKP7.4は、2004年度の200m毎の横断測量結果を用い、KP7.4からKP11.2は、2001年度の200m毎の横断測量結果を用いた。KP11.2より上流は、1km毎の横断測量結果を用いた。河床高と川幅を図-8に示す。マンニングの粗度係数は初期水位に一致するように試行錯誤により決定した。上流の境界条件は岩保木の単位幅流量 $q[m^2/s]=1.0625$ を一定値与え、下流の境界条件は1分毎の釧路港の潮位データを与えた。計算距離間隔 $\Delta x$ は200m、計算時間間隔 $\Delta t$ は、CFL条件を用いてクーラン数を0.05として計算した。

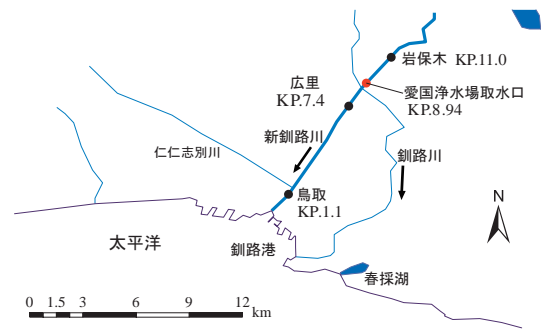


図-7 新釧路川の概況

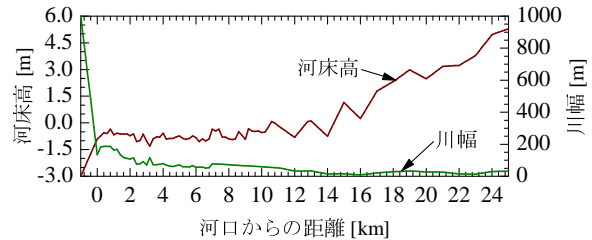


図-8 新釧路川における河床高と川幅

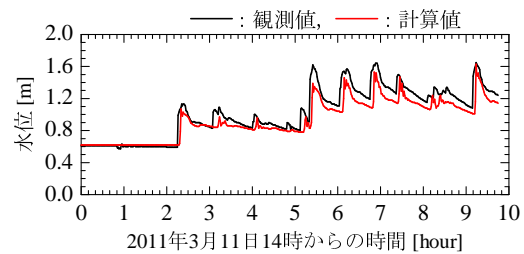


図-9 観測値と計算値の水位の時間変化(広里 KP.7.4)

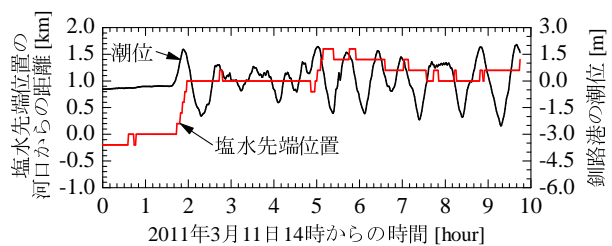


図-10 河川津波による塩水遡上の塩水先端位置の時間変化(2011年3月11日)

##### (3) 河川津波の再現計算

KP7.4の広里観測所における1分毎の観測水位と計算水位を図-9に示す。計算水位と観測水位の絶対誤差の平均値は約38cmであり、波峰部の観測値と計算値の誤差の平均値は、水位が9.2cm、時刻が2.2秒であった。本検討では、水位の上昇と下降の挙動について、計算値は観測値を再現していると判断し検討を進めた。

塩水が到達した地点を調べるために、横軸に時間、縦軸に塩水先端位置および釧路港の潮位として図-10に示す。河川津波遡上前の塩水先端位置はKP0.0である。なお、河川津波遡上前は干潮時であった。大潮期の干潮時は河口まで塩水が遡上しないことが観測<sup>10)</sup>されており、本計算モデルの計算値も同様の結果を得ている。

図-10より、最大潮位178cmの津波第一波が遡上すると、塩水先端位置はKP0.0からKP1.0まで1km移動し

ている。既往研究<sup>10)</sup>によると、最大潮位 131cm の大潮期の満潮時において 20psu 以上となる場所は KP0.5 付近で、希釈されて 2psu~8psu 程度となる場所は KP0.9 付近であり、KP1.0 までは塩水は遡上しないことが観測されている。今回の河川津波の第一波は、大潮期の満潮時よりも塩水が遡上していたことが分かる。

図-10 において、第一波以降は引き波時においても塩水先端位置は変化しておらず、約 5 時間後の潮位がそれ以前に比べて高くなる時刻において、塩水先端位置は KP1.0 から KP1.6 まで 0.6km 移動している。その後、徐々に塩水先端位置は後退している。また、実現象として KP8.94 に位置する取水口において塩水が観測されていないが、計算結果も塩水が到達しておらず同様の結果を得ている。

本計算モデルにより、実河川における河川津波による塩水先端位置は、第一波、第二波と津波が河川を遡上するタイミングで上流へと遡上し、引き波時においては直ぐさま流下しないことが示唆された。

## 5. まとめ

本研究から得られた知見は以下である。

1. 水理実験および鉛直 2 次元計算の検討結果より、河川津波によって水位が上昇する場合、上昇した流体は必ずしも塩水であるとは言えず、上流域ほど塩水は希釈される。
2. 鉛直 2 次元計算の検討結果より、河川の水位を超える津波が遡上する場合には、河川水面を乗り越えて津波は遡上する。
3. 鉛直 2 次元計算の検討結果より、津波の高さが高く河川の流れが遅いほど、塩水は上流へと遡上する。
4. 1 次元 2 層流計算の検討結果より、河川津波による

塩水先端位置は、第一波、第二波と津波が河川を遡上するタイミングで上流へと遡上し、引き波時においては直ぐさま流下しない。

**謝辞:** 本研究は、(株) 水工リサーチより水理実験の御協力を頂き、JSPS 科研費若手研究 (B)26870023 の助成を受けました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 河川津波対策検討会：河川への遡上津波対策に関する緊急提言，国土交通省報道発表資料，p.1, p.4, 2011 年。
- 2) 田中仁：河川遡上津波による被害の特徴，河川技術に関するシンポジウム，東日本大震災津波災害特別セッション「今次津波災害と河川技術」，[<http://committees.jsce.or.jp/hydraulic01/node/44>](参照 2015/3/18)。
- 3) 米山望，松宮弘信，鮫島竜一：淀川における河川遡上津波発生時の三次元塩水挙動解析，河川技術論文集，第 16 巻，pp.265-270, 2010。
- 4) 土木学会編水理公式集，土木学会，p.45-p.46, 1985。
- 5) 工藤拓也，木村一郎，清水康行，安田浩保，清治真人：構造物を用いた塩水遡上の制御に関する数値シミュレーション，水工学論文集，第 53 巻，pp.1351-1356, 2009。
- 6) Munk, W. H., and Anderson, E. R. : Notes on the theory of the thermocline, Jour. of Marine Research, Vol.3, pp.276-295, 1948。
- 7) 吉川泰弘，安田浩保，渡邊康玄：透過性構造物による塩水遡上抑制効果についての研究，寒地土木研究所月報，No.657, pp.2-14, 2008。
- 8) 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，pp.263-267, 1966。
- 9) 阿部孝章，吉川泰弘，安田浩保，平井康幸：2011 年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波の北海道内における河川遡上，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.68, No.4, pp.I.1525-I.1530, 2012。
- 10) 北海道立釧路水産試験場：新釧路川河口域の水質・底質，釧路水試だより，85 号，pp.6-9, 2005。

(2015. 3. 18 受付)

## A STUDY OF SALINITY INTRUSION BY TSUNAMI IN RIVER

Yasuhiro YOSHIKAWA, Takaaki ABE, Makoto NAKATSUGAWA and Jungo FUNAKI

This study aimed to clarify the phenomenon of salinity intrusion by tsunami in river. Influence of tsunami height and flow velocity given to salinity intrusion is examined by vertical 2-dimensional unsteady flow numerical calculation. The long term phenomenon of salinity intrusion by tsunami in real river is examined by 1-dimensional 2-layer unsteady flow numerical calculation. We conducted the validity of these numerical calculations by a hydraulic experiment. The following knowledge was acquired by this study. 1) When water level goes up by tsunami in river, This fluid, which is going up may not be salt water. 2) When the tsunami exceeding water surface of the river occurs, Tsunami flows quickly on the water surface of the river. 3) In the conditions that tsunami height is high and flow velocity is late, salt water ascends to the up-stream side. 4) When the tsunami which ascended to the river flows into the down-stream side, salt water tip position does not immediately flow into the down-stream side.