

河川津波による塩水遡上現象に関する一考察

A study of Salinity Intrusion by tsunami in rivers

北見工業大学 正員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
 寒地土木研究所 正員 阿部 孝章 (Takaaki Abe)
 室蘭工業大学 正員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)
 北見工業大学 正員 渡邊 康玄 (Yasuharu Watanabe)

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¹⁾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ことが報告²⁾されており、その危険性が再認識されている。河川津波による被害として、河川内の堤外地では、流水および漂流物が橋や樋門、護岸などの河川内構造物に衝突し、河川内構造物が損傷および破壊される被害がある。家屋等がある堤内地では、河川津波が堤防を越水することや樋門を逆流することにより流水が堤内地へと流れる氾濫被害、河川内の排水溝に流水が逆流しマンホールを噴き上げる等の被害、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。このため、河川津波によって塩水がどのように遡上・流下するののかに関する知見は有益であり、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³⁾では、平面二次元津波挙動解により流動場を求め、塩水挙動は移流拡散方程式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挙動を明らかにしており、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、より高精度な現象解明のためには、塩水密度を考慮すること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し、防災・減災対応を考える上での基礎資料を得ることを目的として、密度を考慮した1次元2層流計算モデルを新釧路川へ適用し、河川津波の塩水遡上現象の解明を試みた。さらに、津波規模の違いによる河川津波の塩水遡上現象の変化を把握するために、本計算モデルを用いて感度分析を行いその応答をみた。

2. 河川津波の塩水遡上計算モデル

計算モデルは、北海道東部に位置する網走川の塩水遡上現象を対象に水位、淡水流速、塩水流速の計算値と観測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層流モデル⁴⁾を用いた。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を再現できない。このため、本計算モデルで得られる塩水遡上位置は、ある濃度の塩水が到達する位置となり、淡水と塩水が混合した汽水性の流体は、さらに上流へと遡上している可能性がある。本計算モデルは、ある濃度の塩水が河川を遡上する地点を計算することが可能である。

淡水層の連続の式は式(1)、塩水層の連続の式は式(2)である。淡水層の運動の方程式は式(3)、塩水層の運動の方程式は式(4)である。

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

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

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

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

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

h [m]: 水深, Q [m³/s]: 流量, B [m]: 川幅, u [m/s]: 流速, i_0 [無次元]: 河床勾配, i_f [無次元]: 摩擦勾配, x [m]: 縦断距離, t [s]: 時間, g [m/s²]: 重力加速度であり9.8を与えた。添え字1は上層(淡水層), 添え字2は下層(塩水層)を表す。 ρ [g/cm³]: 流体密度であり、密度 ρ は次式のknudsenの式で与えた。 T []: 水温, C_L [psu]: 塩分濃度であり、測定データがないため、淡水と塩水ともに水温は4, 塩分濃度は30psuを与えた。

$$\rho = \sigma_t / 1000 + 1$$

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

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

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= -0.069 + 1.4708C_L \\ &\quad - 0.001570C_L^2 + 0.0000398C_L^3 \\ A_t &= T(4.7869 - 0.098185T + 0.0010843T^2) 10^{-3} \\ B_t &= T(18.030 - 0.816400T + 0.0166700T^2) 10^{-6} \end{aligned}$$

摩擦勾配 i_{f1} , i_{f2} は、式 (6), 式 (7) を用いた。

$$i_{f1} = \frac{f_i}{2gh_1}(u_1 - u_2)|u_1 - u_2| \quad (6)$$

$$\begin{aligned} i_{f2} &= \frac{f_b}{2gh_2}u_2|u_2| \\ &\quad - \frac{f_i}{2gh_2}(1 - \epsilon)(u_1 - u_2)|u_1 - u_2| \quad (7) \end{aligned}$$

f_i は界面抵抗係数, f_b は河床粗度に関する抵抗係数である。界面抵抗係数 f_i は、上層のフルード数とレイノルズ数を用いた金子の式⁵⁾として、式 (8) を用いた。河床粗度に関する抵抗係数 f_b は、式 (9) のマンシングの式を適用した。式 (9) の n はマンシングの粗度係数である。

$$f_i = 0.2 \times (ReF_d^2)^{-0.5} \quad (8)$$

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

$$f_b = \frac{2gn^2}{h_2^{1/3}} \quad (9)$$

式 (8) の金子の式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、適用範囲は、 $10^2 \leq (ReF_d^2) \leq 6 \times 10^5$ である。

3. 2011年3月11日の新釧路川の再現計算

本計算モデルを2011年3月11日の新釧路川へ適用し、水位の計算値と観測値の比較、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について検討を行った。

(1) 新釧路川の河川津波

新釧路川の概況を図-1に示す。釧路川は湿原地帯を蛇行しながら南下し、岩保木において新釧路川と(旧)釧路川に分流する。新釧路川からは久著呂川、雪裡川が合流し、河口近くで更に仁々志別川が合流し太平洋に注ぐ。河床勾配は、釧路湿原から新釧路川河口部までが1/8,000~1/3,000程度である。取水口は、図-1より河口から8.94km上流に位置していることが分かる。なお、図-1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⁶⁾の報告によると、第一波の最大水位の時刻は、鳥取で15:59、広里16:21、岩保木16:45であり、9.9kmを46分で遡上した。最大波の到達時刻は、鳥取23:40、広里12日00:02、岩保木12日00:27であり、9.9kmを47分で遡上している。



図-1 新釧路川の概況

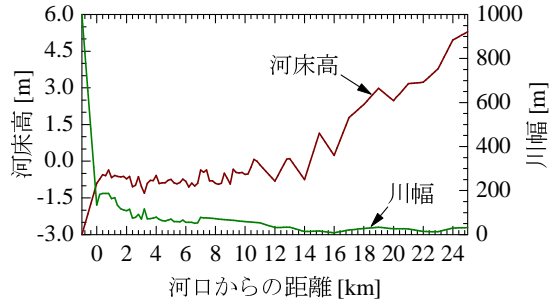


図-2 本計算に用いた新釧路川における河床高と川幅

(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9.45時間とした。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、海域を想定しており、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。計算に用いた河床高と川幅を図-2に示す。マンシ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 $q[\text{m}^2/\text{s}] = 1.0625$ を一定値で与え、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 Δx は200m、計算時間間隔 Δt はCFL条件を満たすように式(10)から算出した。

$$\Delta t = \frac{C_r \Delta x}{u_{max} + \sqrt{gh_{max}}} \quad (10)$$

$u_{max}[\text{m/s}]$: 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, $h_{max}[\text{m}]$: 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, C_r : クーラン数で0.05として設定した。

(3) 計算結果

KP7.4の広里観測所において、1分毎の観測水位と計算水位を図-3に示す。今回の計算水位と観測水位の絶対誤差の平均値は約38cmであった。絶対誤差は大

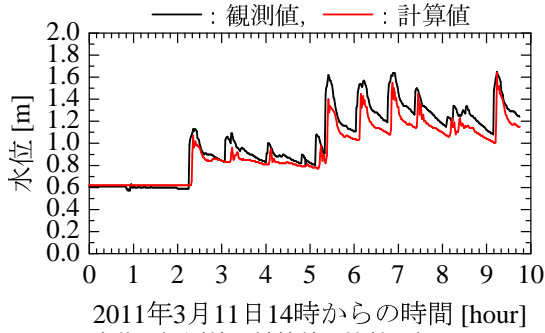


図-3 水位の観測値と計算値の比較 (広里 KP7.4)

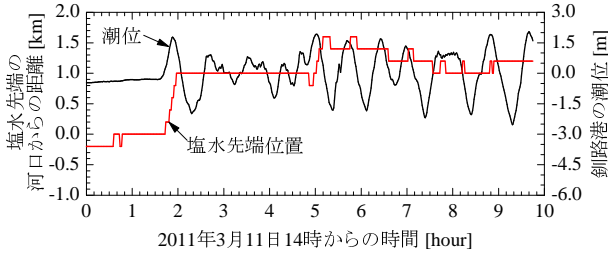


図-4 河川津波による塩水遡上の塩水先端位置の変化 (2011年3月11日)

きな値であるものの、水位の上昇と下降の挙動について、計算値は観測値を良く再現していると判断し検討を進めた。

河川津波による塩水遡上がどの地点まで到達しているのかを調べるために、横軸に時間、縦軸に塩水先端位置および釧路港の潮位をとり図-4 に計算結果を示す。津波遡上前は、塩水先端位置は KP0.0 である。津波遡上前は干潮時であり、既往研究⁷⁾によると、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。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⁷⁾によると、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。今次津波は、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-4 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、河川津波の塩水遡上現象は、第一波、第二波と津波が河川を遡上するタイミングで塩水は上流へと遡上し、引き波時においては塩水はすぐさま流下しないことが推定された。

4. 河川津波の塩水遡上に関する感度分析

津波規模の違いによる河川津波の塩水先端位置の変化を把握するために、本計算モデルを用いて感度分析を行いその応答をみた。

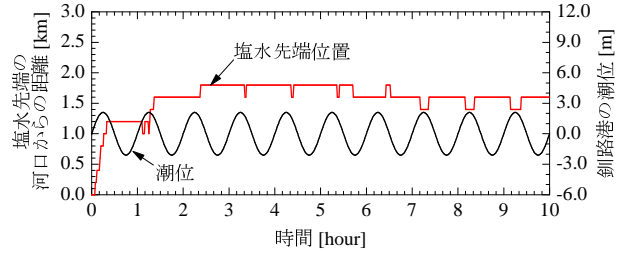


図-5 河川津波による塩水遡上の塩水先端位置の変化 (波高 2.1m)

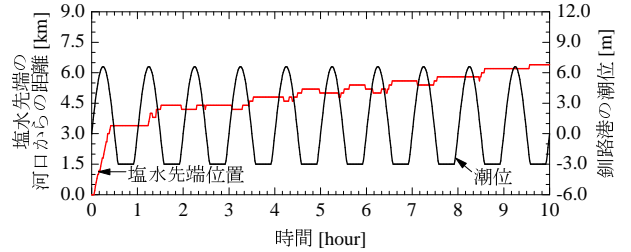


図-6 河川津波による塩水遡上の塩水先端位置の変化 (波高 6.6m)

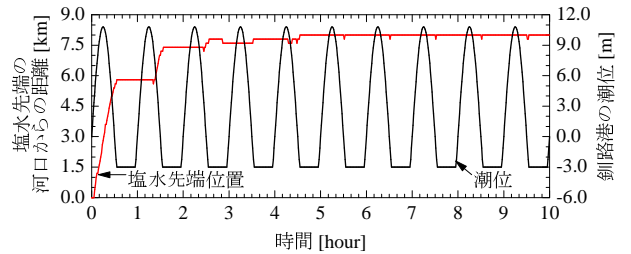


図-7 河川津波による塩水遡上の塩水先端位置の変化 (波高 10.8m)

(1) 計算条件

2011年3月11日の新釧路川の再現計算において、津波が連続して遡上することにより現象が変化することが推定されたため、津波は 10 波連続して発生させた。津波の一波長は sin 波で与え周期は 3600 秒とした。なお、下流端の河床高は -3m であり、波高はこれ以下にならないように設定した。波高は、今次津波の最高遡上高 2.1m、2006 年に北海道が発表した津波浸水予測図の最高遡上高である 6.6m、同様に 2012 年に北海道が発表した最高遡上高 10.8m とした。上流端の流量は今次津波の再現計算と同様とした。

(2) 計算結果

波高 2.1m, 6.6m, 10.8m における河川津波による塩水先端位置の変化を図-5,6,7 に示す。第一波による塩水先端位置をみると、波高 2.1m で KP1.2、波高 6.6m で KP3.4、波高 10.8m で KP5.8 となり、塩水先端位置 ÷ 波高の値をみると、順に 0.57, 0.52, 0.54 であり、波高が高いほど塩水が河川を遡上する。第二波による塩水先端位置をみると、波高 2.1m で KP1.2 から KP1.6 となり 0.4km 遡上、波高 6.6m で KP3.4 から KP4.4 となり 1.0km 遡上、波高 10.8m で KP5.8 から KP7.4 となり 1.6km 遡上しているのが分かる。最終的には、波高 2.1m で KP1.8、波高 6.6m で KP6.4、波高 10.8m で KP8.0 であった。波高 10.8m において、第五波目で 30psu の塩水が KP8.0 まで到達する。このような流況では、希釈された塩水は、さらに上流に遡上すること

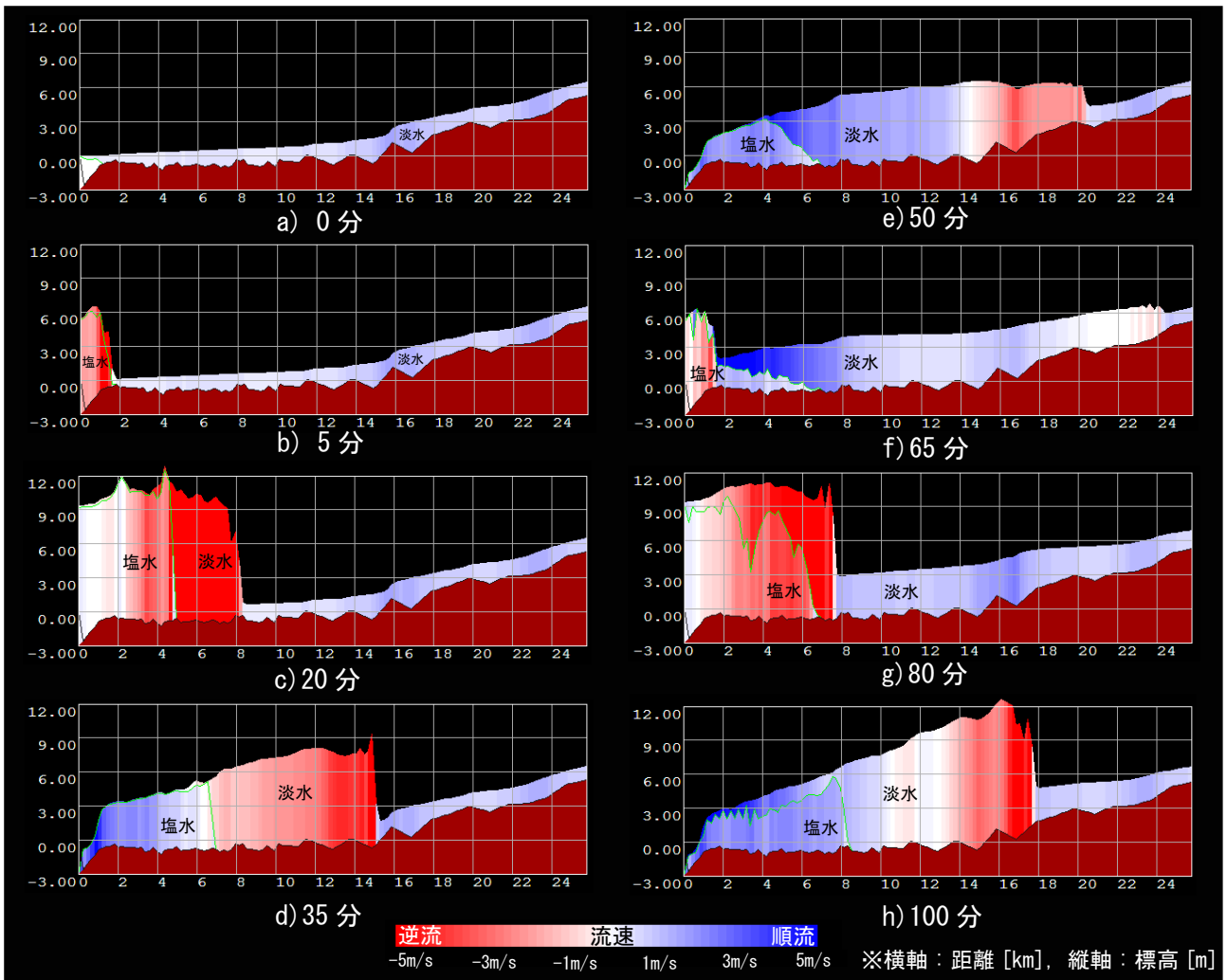


図-8 本計算モデルによる河川津波の塩水遡上現象の流況 (波高 10.8m, 横軸は KP-1.0 からの距離)

が推定され、KP8.94の取水口に希釈された塩水が到達する可能性が高いことが予見される。一方で、第一波のみであれば、塩水先端位置はKP5.8であり、取水口に到達しても十分に希釈されている可能性が高い。

波高 10.8m における河川津波の塩水遡上の流況を図-8 に示す。青が順流、赤が逆流である。流況を以下に示す。a) 塩水先端位置は KP0.0 にある。b) 第一波の津波が発生し、津波は全て塩水となっている。c) 塩水が淡水を上流へと押し上げる。この時点で淡水と塩水が混合していると考えられる。e) 押し上げられた淡水は上流へと遡上し、塩水は下流へと流下する。f) 第二波の津波が発生。h) 第一波よりも塩水先端位置が上流へと移動する。

5. まとめ

本研究により以下のことが明らかとなった。本計算モデルにより、河川津波の塩水遡上現象は、第一波、第二波と津波が河川を遡上するタイミングで塩水は上流へと遡上し、引き波時には塩水はすぐさま流下しないことが推定された。また、塩水が淡水を上流へと押し上げる段階で、淡水と塩水が混合し希釈されて塩水が上流へと遡上することが推察された。波高 10.8m

の津波において、第五波目では、KP8.94の取水口に希釈された塩水が流入する可能性があることが計算結果及び考察から推定された。

謝辞：本研究は、釧路市および北海道開発局より研究資料の提供を頂いた。科研費基盤研究 (B)24360197 及び河川整備基金 24-1114-001 の助成を頂いた。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」，2011。
- 3) 松宮弘信，米山望，田中尚，鮫島竜一，佐藤広章：河川遡上津波発生時の淀川大堰上流部における塩水挙動解析 自然災害科学自然災害科学，28-2，pp.125-135，2009。
- 4) 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。
- 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，pp.263-267，1966。
- 6) 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.L1525-L1530，2012。
- 7) 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。