

## 越流を考慮した河川津波の一般断面 1 次元不定流計算

One-dimensional unsteady flow calculation with an overflow for River-tsunami

寒地土木研究所 ○正会員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)  
寒地土木研究所 正会員 阿部 孝章 (Takaaki Abe)  
寒地土木研究所 正会員 平井 康幸 (Yasuyuki Hirai)

### 1. はじめに

2011 年 3 月東北地方太平洋沖地震による津波は、河川を遡上し堤防を越えて沿川地域へと流れ被害を拡大<sup>1)</sup>させた。国土交通省による河川津波対策検討会では、この現状を踏まえて、津波の河川遡上の対策強化として堤防高の見直しを緊急的に提言した。この中で施設計画上の堤防高の設定手法については、今次津波の河川遡上において左右岸で水位の差があったことから、平面 2 次元計算を推奨<sup>1)</sup>している。

実際に、津波が河川を遡上した場合においては、防災・減災対応として、河川巡視を実施し時々刻々と変化する現場状況を把握して、適切な措置を迅速に行うこととなる。これらの対応を的確に行うためには、事前に河川巡視の時間帯・重点箇所などの巡視計画を作成しておくことが望まれる。しかし、津波の河川遡上は、津波の規模だけでなく河川流量に応じて異なり、河川縦断的な現象である。このため、地点毎の現地観測データのみでは、河川縦断的な現象を十分には把握できない。さらに、積雪寒冷地の河川では、流量規模が大きくなる時期として、洪水時よりも長期間となる融雪時が存在するため、河川流量の影響を考慮することが求められる。

本研究は、津波の河川遡上時の防災・減災対応を定める上で必要となる基礎資料の提供を目的に、津波規模と流量規模に応じて計算が可能であり、より実際に近づけるために、堤防からの越流を考慮した河川津波の計算モデルの開発を試みた。開発した計算モデルの妥当性については、水理実験および現地観測から確認した。なお、本研究では災害直後の対応に着目していることから、本計算モデルを用いて、事前に、津波規模と河川流量に応じた計算を実施することを想定している。このため、本計算モデルは、平面 2 次元計算よりも計算負荷が小さい一般断面 1 次元不定流計算とした。

### 2. 河川津波の一般断面 1 次元不定流計算

本計算のフローを図-1 に示す。初期条件、境界条件の入力では、計算上の時間と距離に関する値、時間毎の水理量と横断毎の河道に関する値を入力する。横断面データから各関係式を導出する方法は、横断測量データにおける最深河床高から、幾何学的に任意の間隔で水位を上昇させ、各水位における流積、潤辺、径深を算出する。これらのデータを用いて、任意の間隔毎に、線形式を立てることにより関係式を得る。次に、一般断面の不等流計算<sup>2)</sup>を行い、水理量の縦断的な初期条件

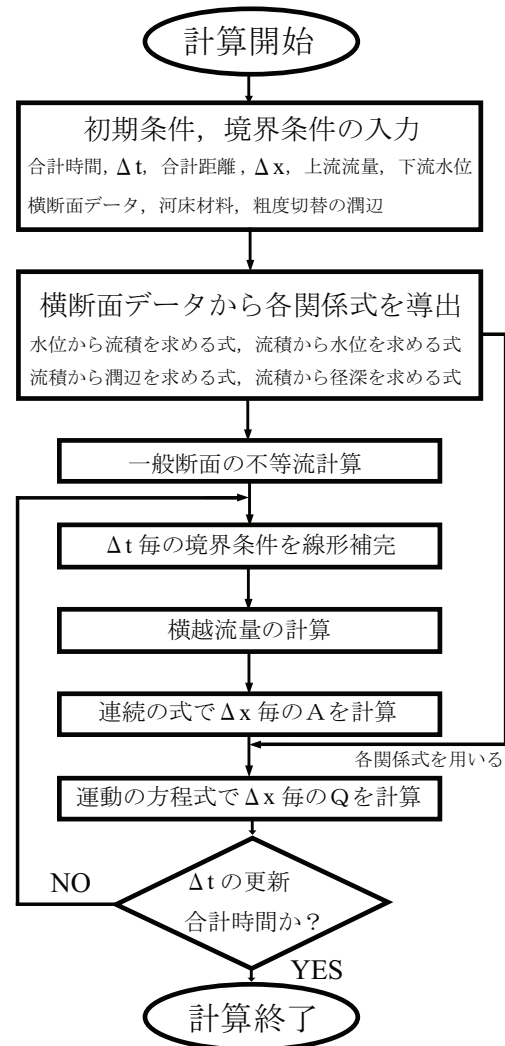


図-1 河川津波の一般断面 1 次元不定流計算のフロー図

を計算する。そして、合計時間まで  $\Delta t$  毎に、水理量の境界条件を線形補完し、横越流量の式、連続の式、運動の方程式の計算を繰り返す。なお、横断面データから得られた各関係式は、運動の方程式の前で用いる。

#### (1) 横越流量の計算

横越流量の計算は、完全越流の場合の本間の越流公式<sup>3)</sup>である式 (1) を基にして、有効疎通率  $C$  と流入角  $\theta$  の補正<sup>4)</sup>を加えた式 (2) を用いた。

$$Q_0 = 0.35 B h' \sqrt{2gh'} \quad (1)$$

$$Q' = Q_0 \cdot (C \cdot \cos \theta) \quad (2)$$

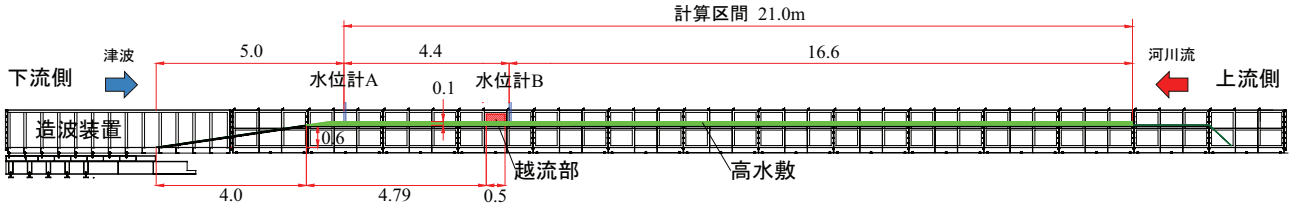


図-2 実験水路の縦断面図 (単位:m)

$Q_0$ [m<sup>3</sup>/s]: 汜濫流量,  $B$ [m]: 越水幅,  $h'$ [m]: 越水水深,  $g$ [m/s<sup>2</sup>]: 重力加速度,  $Q'$ [m<sup>3</sup>/s]: 補正された越流量. 補正式<sup>4)</sup>は, 式 (3), 式 (4), 式 (5) である.

•  $I \leq 1/33600$  の場合

$$(C \cdot \cos \theta) = 1 \quad (3)$$

•  $1/33600 < I \leq 1/1580$  の場合

$$(C \cdot \cos \theta) = 0.14 + 0.19 \times \log_{10}(1/I) \quad (4)$$

•  $I > 1/1580$  の場合

$$(C \cdot \cos \theta) = 0.14 + 0.19 \times \log_{10}(1/I) \times \cos\left(\frac{2\pi}{360} (48 - 15 \times \log_{10}(1/I))\right) \quad (5)$$

$C$ [無次元]: 有効疎通率,  $\theta$ [rad]: 流入角,  $I$ [無次元]: 河床勾配である.

補正式を導出する過程において, 実務的な観点からパラメーターを河床勾配としている<sup>4)</sup>. これは, 河床勾配が急になるほど, 水面勾配が大きくなり, 流速が速くなるため, 越流部の死水域部分による縮流が大きくなり, 結果として越流量が小さくなる影響を考慮したものである. また, 前提条件として, 通常時の河川の流は上流から下流へと流れるため, 河床勾配と水面勾配はほぼ等しいという仮定を基にしている.

一方で, 河川津波の流れは下流から上流へと流れるため, 河床勾配と水面勾配は等しくはならないと考えられる. このため, 本研究では, 河川津波時の横越流については, 式 (4) と式 (5) の  $I$  を, 計算断面毎の水面勾配  $I_w$  とした. なお, 水面勾配  $I_w$  は順流と逆流で正負を持つため, 式 (6) の  $I_w$  は絶対値を与えた.

$$I = I_w \quad (6)$$

## (2) 流れの基礎式

連続の式は式 (7) を, 運動の方程式は式 (8) を用いた. 非線形分散波理論式は式 (8) の右辺第一項とした. この項は, 安田により提案<sup>5)</sup>された Peregrine の式<sup>6)</sup>を一般河道断面へ拡張した式である. なお, 本計算式は碎波を考慮していない.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial}{\partial x} (z + h) + \frac{g n^2 u^2 S}{R^{1/3}} = \frac{R^2}{3} \frac{\partial^3 Q}{\partial t \partial x^2} \quad (8)$$

$A$ [m<sup>2</sup>]: 流積,  $Q$ [m<sup>3</sup>/s]: 流量,  $t$ [sec]: 時間,  $x$ [m]: 距離,  $z$ [m]: 河床高,  $h$ [m]: 水深,  $n$ [s/m<sup>1/3</sup>]: Manning の粗度係数,  $u$ [m/s]: 流速,  $R$ [m]: 径深,  $S$ [m]: 潤辺である. 計算方法は, 従属変数を空間的に千鳥状 (staggered) に配置し時間的に蛙飛び (leap-frog) に進める差分式で行った. 非線形分散波理論式については, 2 段階混合差分法<sup>7)</sup>を適用し陰的に解いた. なお, 越流する場合は, 河川流量から越流量を引き, 得られた越流後の河川流量を式 (7) の左辺第二項に与えた.

## (3) Manning の粗度係数

一般断面においては, 低水路の粗度に加えて高水敷の粗度を評価する必要がある. 本計算モデルの Manning の粗度係数は, 低水路の粗度と高水敷の粗度を合成した式 (9) の合成粗度係数<sup>8)</sup>とした.

$$n' = \left( \frac{\sum_{i=1} (n_i^{3/2} \cdot S_i)}{S} \right)^{2/3} \quad (9)$$

$n'$ [s/m<sup>1/3</sup>]: 合成粗度係数,  $n_i$ [s/m<sup>1/3</sup>]: 各部位  $i$  の Manning の粗度係数 (例えば, 低水路の粗度  $n_1$ , 高水敷の粗度  $n_2$ ).  $S_i$ [m]: 各部位  $i$  の潤辺 (例えば, 低水路の潤辺  $S_1$ , 高水敷の潤辺  $S_2$ ).  $S$ [m]: 合計した潤辺 (例えば,  $S = S_1 + S_2$ ).

## 3. 本計算モデルの妥当性

本計算モデルの妥当性を確認するために, 水理実験において水位と越流量, 実河川において水位の観測値と計算値の比較を行った.

### (1) 水理実験

#### a) 実験条件

実験水路を図-2 に示す. 実験水路は, 全長 34m, 水路幅 0.5m, 水路勾配 1/1000 である. 上流側から 3.7L/s の流量を下流へと流し, 下流側のプール部に設置した造波板を, 距離 1.476m を 6 秒で移動させることにより津波を発生させた. 水位を時系列で測定するために, 図-2 の水位計 A と水位計 B の位置に, 波高計 (KENEK CHT4-60, 測定精度  $\pm 3.5$ mm) を設置し 0.05 秒毎に測定を行った. 水路を遡上する津波を横越流させるために, 水位計 A の位置より上流, 3.8m から 4.3m の区間において, 水路左側面の縦断方向に 0.5m の越流部を図-3 のように設けた.

越流量を時系列で測定するために, 実験水路外に波高計を設置した水槽を配置し, 実験前に水槽内の水位

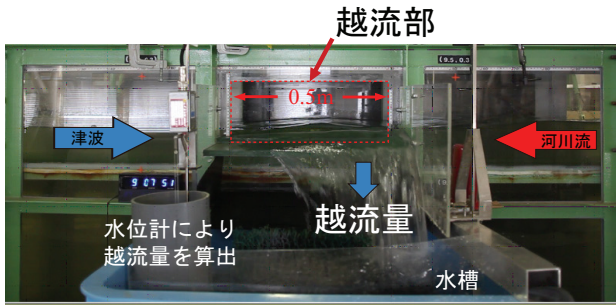


図-3 実験水路の越流部の越流状況

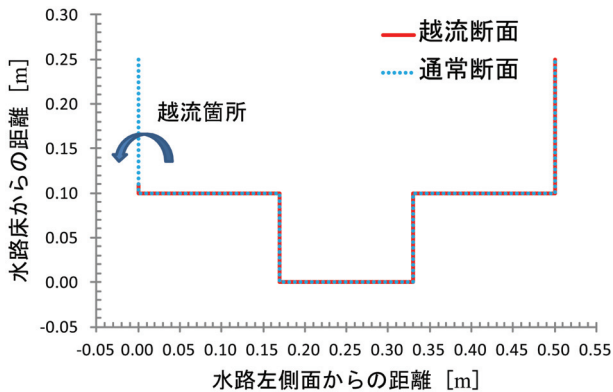


図-4 実験水路の横断面図

と水量の関係式を求めた。越流した流水が水槽内へ貯留され、時系列で測定される水槽内の水位から時系列の越流量を求めた。水路の横断面を図-4に示す。水路幅0.5mに対して、低水路幅0.16m、低水路高0.10m、左側高水敷幅0.17m、右側高水敷幅0.17m、左側高水敷高から越流部までの高さは0.01mである。

#### b) 計算条件

計算時間45秒、 $\Delta t$ はCourant数0.01で与え、計算区間21m、 $\Delta x$ は0.1mとした。上流流量は3.7L/s、下流水位は図-2の水位計Aの測定値を与え、横断面データは、図-4の横断面を基に、各断面毎に水路勾配1/1000で水路高を高くして与えた。低水路の粗度0.025、高水敷の粗度0.020を与えた。

#### c) 実験値と計算値の比較

計算区間下流端から上流4.4m地点における水位の実験値と計算値を図-5に示す。本計算モデルは碎波を考慮していないため、津波の波峰部において、計算値は実験値よりも高くなっている。波峰部以外では、計算値は実験値の水位の上昇から下降までを再現している。

時系列の越流量の実験値と計算値を図-6に示す。この図には、式(4)と式(5)の $I$ において、通常の水路勾配とした計算値と、本研究で提案した水面勾配とした計算値をプロットしている。図-6より、 $I$ を水面勾配とした計算値の方が、水路勾配とした計算値よりも、時系列の越流量の実験値を定量的に再現している。

### (2) 実河川

#### a) 十勝川における河川津波

十勝川は沖積平野を緩やかに蛇行した後に太平洋に注ぎ、下流部の河床勾配は約1/3000～1/4500である。阿部ら<sup>9)</sup>は、北海道内の新釧路川、十勝川、石狩川、鶴

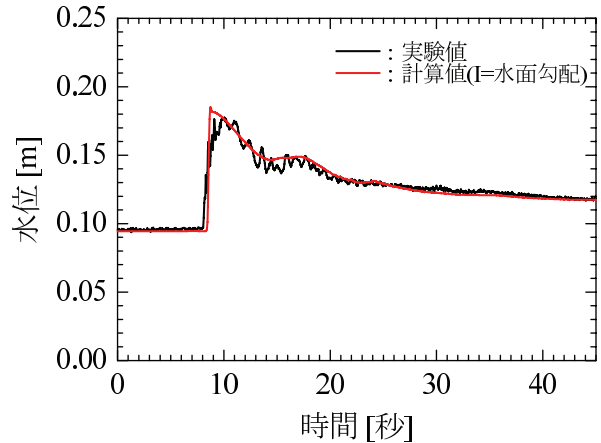


図-5 水位の実験値と計算値（計算区間下流端から上流4.4m地点、図-2の水位計Bの地点）

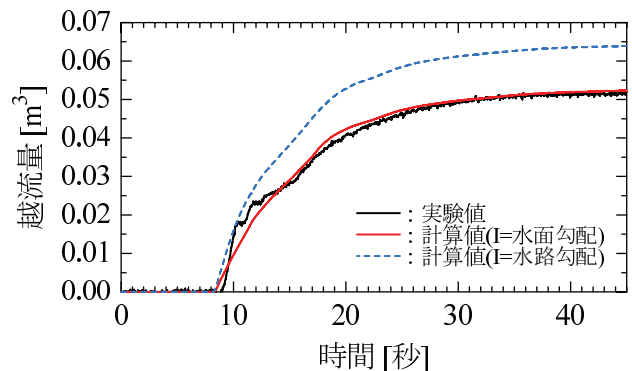


図-6 越流量の実験値と計算値（計算区間下流端から上流3.8mから4.3mの越流部からの越流量）

川、沙流川、留萌川、天塩川、網走川の計8河川を対象に、今次津波における河川遡上現象を水位記録から分析している。この8河川の中で最も大きな水位変動を記録している河川は、十勝川であることが報告されている。このため、本研究では、今次津波による水位変動が大きい十勝川を対象として計算を行った。

#### b) 計算条件

十勝川を図-7に示す。計算期間は2011年3月11日14:45から3月12日00:45の計10時間、 $\Delta t$ は1秒、計算区間は水位観測所地点を踏まえて河口から3.2kmから河口から21.0kmの計17.8km、 $\Delta x$ は200m毎に横断面測量データが存在するため200mとした。上流の流量は、図-7の茂岩観測所の水位をHQ式に代入して値を得た。下流の水位は、図-7の大津観測所の10秒毎の水位を与えた。横断面データと河床材料は2009年に観測された値を与えた。

実河川における河床のManningの粗度係数 $n_b$ は、水深と河床材料を従属変数とする式(10)に示すLimerinos型Brayの式<sup>10)</sup>を用いた。

$$n_b = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{9.66 + 19.5 \log_{10}\left(\frac{R}{d_{84}}\right)} \quad (10)$$

$d_{84}$ [m]: 84%粒径、なお、本研究では、式(10)を一般断面に適用させるために、水深 $h$ を径深 $R$ に置き換えて用いた。





図-7 十勝川における水位観測所の位置図

## c) 観測値と計算値の比較

図-7の旅来観測所（河口から9.3km）において、10秒毎の水位の観測値と計算値を図-8に示す。なお、本計算では200m毎に計算しているため、河口から9.3kmに位置する旅来観測所の水位と計算水位は直接比較が出来ない。このため、図-8では、河口から9.3kmの観測水位と、河口から9.2kmの計算水位を比較している。

図-8より、計算値は観測値の水位変動を良く再現している。今回の計算水位と観測水位の絶対誤差の平均値は約17cmであった。

河口から9.3km地点の流量と流速の計算値を図-9に示し、計算結果から得られた知見を以下に記す。

図-9の赤実線の流量をみると、津波の河川遡上前は流量 $110\text{m}^3/\text{s}$ であったが、津波の河川遡上時では最大で、下流から上流への逆流（押し波）の流量 $983\text{m}^3/\text{s}$ 、上流から下流への順流（引き波）の流量 $400\text{m}^3/\text{s}$ であった。最大値でみると、押し波時の流量は、遡上前の流量の約9倍の流量が上流へと流れ、引き波時の流量の約2倍の流量が上流へと流れている。つまり、押し波時の流量は、引き波時の流量よりも規模が大きい。一方で、流量の継続時間をみると、押し波時の継続時間は、引き波時の継続時間よりも短い。なお、十勝川の茂岩観測所の豊水流量（年間を通して95日間はこのを下回らない流量）は $250\text{m}^3/\text{s}$ である。

図-9の黒破線の流速をみると、津波の河川遡上前は流速 $0.34\text{m/s}$ であったが、津波の河川遡上時は最大で、下流から上流への逆流（押し波）の流速 $1.29\text{m/s}$ 、上流から下流への順流（引き波）の流速 $0.76\text{m/s}$ であった。最大値でみると、押し波時の流速は、遡上前の流速の約3.8倍の流速で上流へと流れ、引き波時の流速の約1.7倍の流速で上流へと流れている。つまり、押し波時の流速は、引き波時の流速よりも速い。一方で、流速の継続時間をみると、押し波時の継続時間は、引き波時の継続時間よりも短い。

## 4. まとめ

越流を考慮した河川津波の一般断面1次元不定流計算モデルを開発した。本計算モデルは、津波規模と流量規模に応じて計算が可能である。開発した計算モデルは、水理実験における水位と越流量、実河川における水位の観測値と計算値の比較から、計算結果の妥当性を確認した。2011年3月に十勝川を遡上した河川津波の計算結果から、押し波時の流量は、引き波時の流量よりも規模が大きく、押し波時の流量の継続時間は、引き波時の流量の継続時間よりも短いことが推定された。

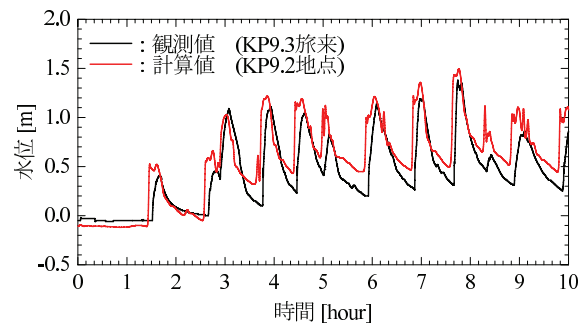


図-8 水位の観測値と計算値（十勝川の河口から9.3km地点）

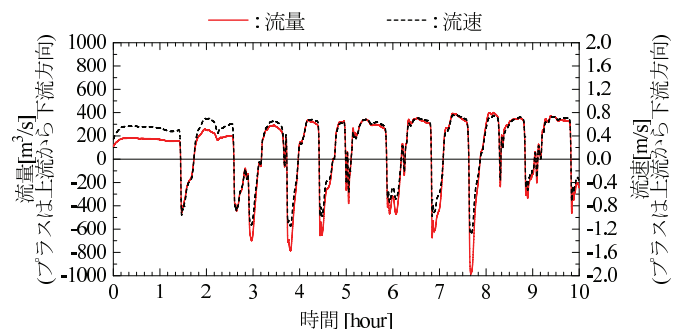


図-9 流量と流速の計算値（十勝川の河口から9.3km地点）

**謝辞：**本研究は、北海道開発局 帯広開発建設部より資料提供のご協力、水工リサーチより水理実験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) 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，pp.1, pp.4, 2011年8月。
- 2) 北海道開発局土木試験所：現場のための水理学，pp.23-33, 1988。
- 3) 本間仁，安芸皎一：物部水理学，岩波書店，1962。
- 4) 栗城稔，末次忠司，小林裕明，田中義人：横越流特性を考慮した破堤氾濫流量公式の検討，土木技術資料，第38巻，第11号，pp.60-61, 1996。
- 5) Hiroyasu Yasuda: One-Dimensional Study on Propagation of Tsunami Wave in River Channels, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.136, No.2, pp.93-105, 2010。
- 6) D.H.PEREGRINE: Long waves on a beach, J. Fluid Mech., vol.27, part4, pp.815-827, 1967。
- 7) 後藤智明：2段階混合差分法を用いた線形分散波方程式の数値計算における打ち切り誤差，津波工学研究報告，第20号，pp.13-22, 2003。
- 8) 国土交通省：美しい山河を守る災害復旧基本方針，参考1-2, 2006年6月。
- 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，水工学論文集，第56巻，2012。（投稿中）
- 10) Bray, D.: Estimating Average Velocity In Gravel-Bed Rivers, Journal of the Hydraulics Division, Vol.105, No.HY.9, pp.1103-1122, 1979。